

一种模糊 PID 自整定调节器的设计

张斯 湜 须文波 吴晖扬

(自动化系)

摘要 基于 Fuzzy 集合理论,设计了一种新型的 PID 自整定调节器。给出了辨识该调节器模糊模型的方法。计算机仿真结果表明,该方法可行的。

主题词 自整定调节器;调节器;模糊模型 / 模糊控制;模糊子集

中图分类号 TP273.24

0 引言

近年来国内外不少学者研究 PID 参数自整定方法。特别是 80 年代中期以来,国内外各大仪表公司陆续给 PID 调节器和分散型控制系统配置了自整定功能。其中,最具代表性的是 1984 年美国 FOXBORO 公司推出的自整定 PID 调节器 EXACT。它在普通 PID 调节规律的基础上,运用专家系统技术实现了在线自整定,使系统品质始终保持最佳。

作者按此设想,用模糊技术自行设计和研制了一种 PID 参数自整定的控制器,且用 STD 总线工控机实现了仪表化。

1 模糊 PID 自整定调节器的原理

如图 1 所示,模糊 PID 自整定调节器分 PID 运算部和自整定部两部分。其中,PID 运算

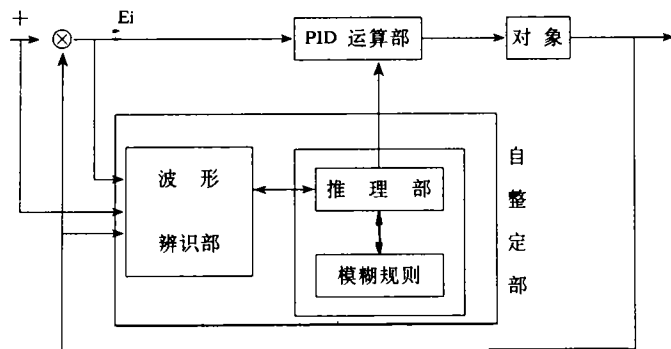


图 1 模糊 PID 自整定调节器结构图

收稿日期:1994 12 27

部完成常规的 PID 调节功能,自整定部完成对控制响应的波形进行在线监视,当测量值偏差超过允许值时,辨识控制响应的波形曲线,找出与最佳响应曲线的区别,求出作为控制性能的指标,然后把这些性能指标作为 IF 部分模糊变量,而 THEN 部分模糊变量为 PID 参数的修正系数,经模糊推理后得出 PID 参数的修正系数,再经修正后得到新的 PID 参数。

2 输入输出语言变量的确定

要确定响应特性的识别依据,即确定输入语言变量,不但要满足特征明显、重复性强的要求,还要具有识别简单,计算量小的特点。为此,吸取了 Foxboro 公司 Exact 自整定调节器的优点,把超调量和衰减率作为系统两个输入语言变量。其定义如下所示:

$$\text{超调量: } \Phi = -E_2/E_1 \quad (1)$$

$$\text{衰减率: } \Psi = \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_2} \quad (2)$$

调节偏差 $e(t)$ 的响应特性如图 2 所示。

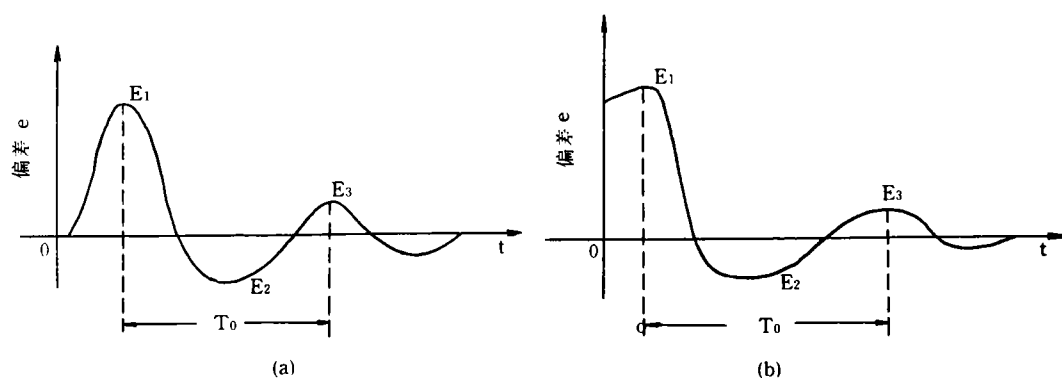


图 2 调节偏差 $e(t)$ 对时间的响应特性

(a) 负荷阶跃变化

(b) 给定值阶跃变化

此外,笔者在对 PID 调节特性大量计算机仿真结果上发现,对于一个一阶惯性纯滞后对象 $G(S) = Ke^{-LS}/(TS + 1)$,在相同的 PID 参数下,其纯滞后时间 L 越长,过程响应周期 T_c 也长,说明过程响应周期 T_c 和对象的可控率 L/T 密切相关,但两者之间没有一一对应的关系。而对于同一可控率的对象来说,对象时间常数 T 越大,所对应的最佳响应的积分时间常数 T_i 也越大,其变化规律和 T_c 对 L/T 的变化规律相似。如果 T_c 和 T_i 相除,可以得出与各类对象相似的 PID 调节特性,便于模糊模型的辨识,所以,把过程响应周期 T_c 和 T_i 的比值作为第三个特性识别输入变量。定义比例增益系数的修正系数 K_{pb} 和 T_i 的修正系数 K_{ib} 为两个输出语言变量。 T_d 参数由 T_d 参数和 T_i 参数的比值 K_{db} 计算而得,该比值可根据不同的对象取不同的值。新的 PID 参数计算公式如下所示:

$$K_p(n) = K_{pb} \cdot K_p(n-1) \quad (3)$$

$$T_i(n) = K_{ib} \cdot T_i(n-1) \quad (4)$$

$$T_d(n) = K_{db} \cdot T_i(n) \quad (5)$$

3 PID 调节特性的计算机仿真

为了找出特性识别输入/输出量之间的关系, 作者对不同的控制对象做了大量的 PID 调节特性的计算机仿真实验, 得到图 3 和图 4 所示的结果。其中, F_p 和 F_i 分别是相对于最佳响应时的 K_p 和 T_i 的修正系数。

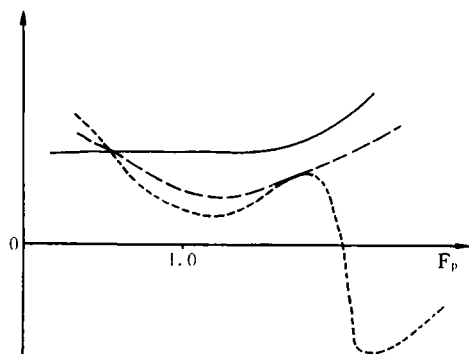


图 3 K_p 对超调, 衰减率及 T_c/T_i 比值影响曲线

—— T_c/T_i ---- Ψ Φ

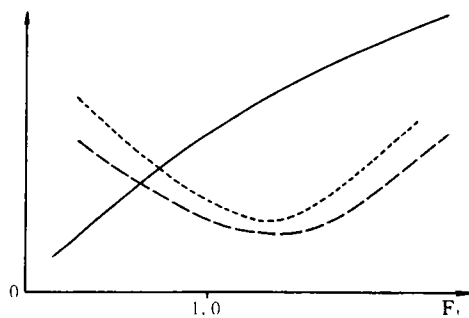


图 4 T_i 对超调, 衰减率及 T_c/T_i 比值影响曲线

—— T_c/T_i ---- Ψ Φ

图 3 中, 假设积分时间常数 T_i 保持在最佳过程响应点 (即 $F_i = 1$) 上, 观察比例增益系数 K_p 的变化对超调量、衰减率和 T_c/T_i 比值的影响。图 4 中, 假设比例增益系数 K_p 保持在最佳过程响应上, 观察积分时间常数 T_i 的变化对超调量、衰减率和 T_c/T_i 比值的影响。

从图 3 中可以看到, F_p 很小时, 即 K_p 很大时, PID 参数中 K_p 占优, 它引起了响应曲线严重的超调量, 衰减率相应也很大。随着 K_p 的减小, Φ 和 Ψ 逐渐下降, 而 T_c/T_i 比值却基本不变。当 K_p 减小到 T_i 占优时, Φ 和 Ψ 重新上升, 尤其当 K_p 减小到响应曲线过阻尼时, Φ 急剧地从正值过渡到负值, T_c/T_i 的比值也相应地上升。

在图 4 中, Ψ 的变化结果和图 3 很相似; 而 Φ 的变化曲线中没有负值的出现, 这是由于 T_i 和 T_d 对 Φ 的影响较小, 没有使响应曲线出现过阻尼的现象, 其变化规律和 Ψ 相似; T_c/T_i 比值的变化规律和图 3 不同, 由于过程响应周期基本不变, 而 T_i 在变化, 故它随着 F_i 的增大而不断地增大。

此外, 对不同的对象, 相应 T_c/T_i 变化的规律相同, 变化的幅度不同, 且对象的 L/T 比值对其影响较大, 对象的时间常数对其影响不大。 L/T 比值越大, T_c/T_i 值的变化范围也越大。 T_c/T_i 比值对 F_p 和 F_i 的线性度较好。

4 模糊子集的定义

通过对不同过程对象的计算机仿真, 得到了输入输出语言变量的基本论域, 并根据它们不同的特点, 分别定义各自的模糊子集。

4.1 超调量输入语言变量模糊子集的定义

根据仿真结果, 可把 Φ 量化成 15 个等级, 分别定义为 0 ~ 14 等级。其量化公式为

$$Y_i = (\Phi + 0.95) / 0.3 \mid \text{取整} \quad (6)$$

共定义了五个模糊子集, A {太小, 较小, 正常, 较大, 太大}, 简记为 A {A1, A2, A3, A4, A5}。

A5}, 其隶属度表如表 1 所示。

4.2 衰减率输入语言变量模糊子集的定义

衰减率输入语言变量 Ψ 量化成 15 个等级, 分别定义为 0 ~ 14 等级。其量化公式为

$$Y_2 = (\Psi + 0.8) / 0.2 | \text{取整} \tag{7}$$

共定义了五个模糊子集, $B: \{\text{太小, 较小, 正常, 较大, 太大}\}$, 简记为 $B\{B1, B2, B3, B4, B5\}$ 。其隶属度表如表 2 所示。

表 1 超调量模糊子集隶属度表						表 2 衰减率模糊子集隶属度表					
基本论域	模糊论域					基本论域	模糊论域				
	A1	A2	A3	A4	A5		B1	B2	B3	B4	B5
0	1					0	1				
1	0.9					1	0.9				
2	0.7	0.3				2	0.6	0.3			
3	0.3	0.7				3	0.3	0.8			
4		1				4		1			
5		0.8	0.2			5		0.8	0.2		
6		0.2	0.8			6		0.2	0.8		
7			1			7			1		
8			0.8	0.2		8			0.8	0.2	
9			0.2	0.8		9			0.2	0.8	
10				1		10				1	
11				0.7	0.3	11				0.8	0.3
12				0.3	0.7	12				0.3	0.6
13					0.9	13					0.9
14					1	14					1

4.3 T_c/T_i 输入语言变量模糊子集的定义

仿真的结果表明, 控制对象的可控率, 即对象纯滞后时间和时间常数之比(L/T), 对 T_c/T_i 基本论域变化范围影响较大, 但对同一类可控率对象来说, T_c/T_i 变化的规律是相同的, 所以, T_c/T_i 输入语言变量根据可控率定义了四种类型的对象, 并把 T_c/T_i 分成小(C1)、中(C2)、大(C3) 三个模糊子集, 它们的隶属度均为 1。这样可降低模糊模型的复杂度, 加快计算机的推理速度。

- (1) $L/T = 0.25$ 左右的对象
- C1

→

$T_c/T_i < 0.35$

C2

→

$0.35 \leq T_c/T_i < 0.65$

C3

→

$T_c/T_i \geq 0.65$
- (2) $L/T = 0.5$ 左右的对象
- C1

→

$T_c/T_i < 0.65$

C2

→

$0.65 \leq T_c/T_i < 1.15$

C3

→

$T_c/T_i \geq 1.15$
- (3) $L/T = 1.0$ 左右的对象
- C1

→

$T_c/T_i < 0.9$

C2

→

$0.9 \leq T_c/T_i < 1.8$

C3

→

$T_c/T_i \geq 1.8$

(4) $L/T = 2.0$ 左右对象

$C1 \rightarrow T_c/T_i < 1.55$

$C2 \rightarrow 1.55 \leq T_c/T_i < 2.75$

$C3 \rightarrow T_c/T_i \geq 2.75$

4.4 F_p 输出语言变量模糊子集的定义

把 F_p 量化成 15 个等级,分别定义为 0—14 等级。其量化公式为

$$Y_3 = (F_p - 0.1) / 0.12 \mid \text{取整} \quad (8)$$

共定义了七个模糊子集, $D: \{\text{太小 小 稍小 正常 稍大 大 太大}\}$, 简记为 $D\{D1 D2 D3 D4 D5 D6 D7\}$ 。其隶属度表如表 3 所示。

表 3 F_p 模糊子集隶属度表

基本论域	模 糊 论 域						
	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$	$D6$	$D7$
0	1						
1	0.7	0.3					
2	0.2	0.7					
3		1.0	0.2				
4		0.7	0.6				
5		0.2	1.0				
6			0.7	0.5			
7				1.0			
8				0.5	0.7		
9					1.0	0.2	
10					0.6	0.7	
11					0.2	1.0	
12						0.7	0.2
13						0.8	0.7
14							1.0

4.5 F_i 输出语言变量模糊子集的定义

把 F_i 量化成 15 个等级,分别定义为 0~14 等级。其量化公式为

$$Y_4 = (F_i - 0.1) / 0.12 \mid \text{取整} \quad (9)$$

共定义了七个模糊子集, $E: \{\text{太小 小 稍小 正常 稍大 大 太大}\}$, 简记为 $E\{E1 E2 E3 E4 E5 E6 E7\}$ 。其隶属度表与如表 3 相同。

5 模糊模型的辨识

模糊推理合成法是将输入输出测量数据对转换成模糊量 X, Y , 应用查德提出的模糊推理合成规则 $Y = X \cdot R$ 建立系统的模糊模型。其具体步骤如下:

1) 采集输入输出语言变量的输入输出数据对(已通过仿真得到), 并确定它们的模糊子集及其相应的隶属度。

2) 计算同一 T_c/T_i 子集内 Fuzzy 输入 A 和 B “交”运算的 Fuzzy 关系 $R_{B \wedge A}$ 。

3) 对每一组 Fuzzy 输入输出数据对进行由输入到输出的 Fuzzy 推理, 即根据 $R_{B \wedge A}$ 计

算 Fuzzy 输出分别属于其各模糊子集(如 $D_1, D_2, \dots, D_7$) 的 Fuzzy 关系。

如 $R_{D_j}, i = \mu_{D_j}, i \wedge R_{B \times A} \quad (j = 1, 2, \dots, 7; i = 1, \dots, m)$ (10)

其中, μ_{D_j}, i 为模糊子集 D_j, i 的隶属度; m 为采集数据的总数.

4) 将全部 m 组 Fuzzy 输入输出数据对的推理结果加以合成,即计算 Fuzzy 关系如 $R_{D_1}, i, \dots, R_{D_7}, i$ 的“并”. 于是,求得

$$R_{D_j} = \bigcup_{i=1}^m R_{D_j}, i \quad (j = 1, \dots, 7)$$
 (11)

5) 对 $R_{D_j}(j = 1, 2, \dots, 7)$ 进行 λ 水平截集处理.在选定阈值 λ 后,将 R_{D_j} 中等于和大于 λ 的元素记为 1, 小于 λ 的元素记为 0. 由此取得 λ 截关系 $R_{D_j}, \lambda(j = 1, 2, \dots, 7)$.

6) 用 Fuzzy 输出的相应子集 D_i 代替 R_{D_j}, λ 中的元素 1, 取得 Fuzzy 关系 $R_{D_i}(j = 1, 2, \dots, 7)$.

7) 将 R_{D_j} 叠加构成一张 Fuzzy 关系总表 R . 该表便是根据输入输出测量数据对为系统建立的模糊模型的一种表达形式. 由该表还可写出一组以 Fuzzy 条件语句 IF... THEN...构成的 Fuzzy 模型的另一种表达形式. 表 4~表 6 是用上述计算过程所得的模糊模型。

表 5 T_c/T_i 属于 C 2 模糊子集

模糊子集	A1	A2	A3	A4	A5
B2					
B3	D5E3	3E5	D4E4	D4E3	D5E3
B4	D6E3		D2E4	D3E3	D4E3
B5			D2E4	D2E4	D1E4

表 4 T_c/T_i 属于 C 1 模糊子集

模糊子集	A1	A2	A3	A4	A5
B1					
B2	D6E3				
B3	D7E2				D4E3
B4	D7E2		D3E2	D3E2	D5E2
B5			D3E2	D3E2	D3E1

表 6 T_c/T_i 属于 C 3 模糊子集

模糊子集	A1	A2	A3	A4	A5
B1					
B2	D5E6	D4E7			
B3	D5E5	D4E7	D5E6		D5E4
B4	D6E1		D5E7		
B5	D7E6		D4E7	D2E7	D1E7

6 结束语

为了检验模糊模型的正确性,作者在实验室进行了数字仿真。仿真时,PID 的参数都有意设定在远离最佳值处。图 5 是对对象传递函数为 $G(S) = e^{-20S}/(40S + 1)$ 的仿真结果。仿真的结果表明,不管初始 PID 参数如何远离最佳值,经过 5 次以内的再计算都最终达到了最佳值,证明模糊 PID 自整定调节器在理论上是可行的。它可适用于时变、纯滞后、非线性不很严重的难控制对象的控制系统中,如发酵控制等。

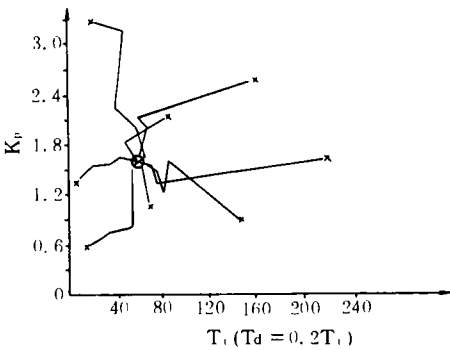


图 5 $G(S) = e^{-20S}/(40S + 1)$ 的仿真结果
● = 最后收敛值 × = 初始整定值

参 考 文 献

- 1 喻 央. 专家法PID自整定调节器 EXACT. 自动化与仪器仪表, 1989, (4)
- 2 迂 远. 新型 YEW SERIES—80 的专家自整定调节器. 自动化与仪器仪表, 1989, (1)
- 3 Kazuo Nakamura, Narumi Sakashita, et al. Fuzzy Inference and Fuzzy Inference Processor, IEEE Micro Oct. 1993, 37~47
- 1 Buckley J J. Universal Fuzzy Controllers. Automatica, 1992, 28(6): 1245~1248
- 5 范全义, 徐博文. 具有最优指标的 PID 参数自整定. 化工自动化及仪表,
- 6 李清泉, 郭 莉. 智能 PID 调节器. 自动化学报, 1993, (5): 336~339
- 7 李友善, 赵福顺. 应用 Fuzzy 集 1 合理论测辨系统 Fuzzy 模型的新方法——Fuzzy 推理合成法. 自动化学报, 1991, (3): 257~262
- 8 高玉琦, 李友善, 马家辰. 水泥回转窑的计算机控制. 自动化学报, 1991, (2): 166~173

The Design for a Fuzzy PID Self-tuning Regulator

Zhang Sishi Xu Wenbo Wu Huiyang

(Dept. of Auto.)

Abstract Using fuzzy set theoretic reasoning, a new type of PID self-tuning regulator is designed. The method of identifying the fuzzy model of the regulator is also discussed in this paper. And its feasibility is tested.

Subject-words Self-tuning regulator; Regulators; fuzzy subsets/fuzzy control; fuzzy models