

变论域自适应模糊PID方法的研究与仿真

朱岩, 郭军平

(西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

摘要: 从优化模糊控制器的角度出发, 讨论了变论域思想和伸缩因子的概念, 同时就量化、比例因子和伸缩因子的关系进行了分析, 进而阐述了一般情况下两种伸缩因子的选取方法; 在此基础上将模糊PID和变论域思想相结合, 形成变论域自适应模糊PID控制结构; 最后通过某复杂非线性系统进行仿真研究, 结果表明该方法达到了预期目的, 优越性明显。

关键词: 变论域; 伸缩因子; 模糊控制; 自适应; 仿真

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)05-0011-03

目前优化模糊控制器的方法主要有3种: 一是专家根据经验定义语言变量的隶属函数和控制规则, 这些隶属函数和控制规则在系统运行过程中保持不变。但对于一个具有特殊要求的系统来说, 不存在确定隶属函数和控制规则的有效准则; 二是根据系统的前期响应利用自组织算法来自动的进行修改规则, 以达到理想的控制效果, 而在较少的采样时间内完成规则库的优化是一个艰苦的工作; 三是减化模糊控制规则, 根据误差给出模糊控制规则的解析表达式, 此种方法没有充分利用人的经验控制。变论域即输入和输出的论域范围可以根据控制需求按一定准则进行伸缩变化。变论域目的是为了各种模糊控制在设计及控制时出现的问题, 使设计更简单而控制效果更好。

1 变论域和伸缩因子

变论域实际上就是输入和输出的基本论域随控制需求按一定准则在适当的时刻进行伸缩变化, 定义在基本论域上的模糊划分也随之变化。这里以2输入—3输出的模糊PID为基础模型, 定义: $[-e_o, e_o]$ 为输入变量 e 的基本论域; $[-e_{co}, e_{co}]$ 为输入变量 e_c 的基本论域; $[-k_{po}, k_{po}]$ 为输出变量 k_p 的基本论域; $[-k_{io}, k_{io}]$ 为输出变量 k_i 的基本论域; $[-k_{do}, k_{do}]$ 为输出变量 k_d 的基本论域。为简单起见统一为: $X_p = [-E_p, E_p]$, $p=1, 2$ 分别为输入变量 x_p ($p=1, 2$) 的基本论域; $Y_q = [-K_q, K_q]$, $q=1, 2, 3$ 分别为输出变量 y_q ($q=1, 2, 3$) 的基本论域; $A_i = \{a_{ij}\}_{1 \leq j \leq m}$ (这里 m 为7) 为 X_p 上的模糊划分; $B_i = \{b_j\}_{1 \leq j \leq m}$ 为 Y_q 上的模糊划分, 则结合模糊推理规则:

如果 x_1 是 a_{1j} , 且 x_2 是 a_{2j} , 那么 y_1 就是 b_{j-1} , y_2 就是 b_j , y_3 就是 b_{j+1} 。此时有: $y(x_1, x_2) = F(x_1, x_2) \triangleq \sum_{j=1}^7 \prod_{i=1}^2 a_{ij}(x_i) y_j$ 。

变论域就是指论域 X_p 和 Y_q 可以分别随着变量 x_p 和 y_q 的变化而自行调整, 推广记为: 输入变量是基本论域 $X(x) = [-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$, 输出变量是基本论域 $Y(y) = [-\beta(y)K, \beta(y)K]$, 其中 $\alpha(x)$ 与 $\beta(y)$ 叫做论域的伸缩因子, E 表示输入变量 e 和 e_c , K 表示输出变量 k_p , k_i 和 k_d , 相对于变论域而言, 原来的论域叫做初始论域。

收稿日期: 2005-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10377014)

作者简介: 朱岩(1965-), 女, 江苏南京人, 讲师, 主要从事系统工程、计算机仿真研究。

2 量化因子和比例因子与变论域的关系

考虑双输入多输出模糊控制器,输入输出基本论域分别为 $[-e_o, e_o]$ 、 $[-e_{co}, e_{co}]$ 、 $[-k_{po}, k_{po}]$ 、 $[-k_{io}, k_{io}]$ 、 $[-k_{do}, k_{do}]$,当与之相对应的量化因子、比例因子取值变化时,会引起输入输出论域的变化。当量化因子 k_e 增大时,基本论域 $[-e_o, e_o]$ 缩小,输入 e 对控制作用就增强;当 k_e 减小时,基本论域扩大, e 对控制的作用减弱。量化因子 k_e 增大时,基本论域 $[-e_{co}, e_{co}]$ 缩小,输入 e_c 对控制器的作用增强;当 k_e 减小时,基本论域扩大, e_c 对控制的作用减弱。而当比例因子增大时,输出基本论域扩大,输出量增大;当比例因子减小时,输出基本论域缩小,输出量减小。可见量化因子和比例因子虽然也有伸缩因子的功能,但其作用是完成精确输入输出和规定档数的转换,而不能适时的对论域进行灵活的变换。

3 伸缩因子的选择

变论域模糊控制器的关键在于怎样确定论域伸缩的合理机制,即确定适当的伸缩因子,使最终的控制效果能够最大限度满足要求。

3.1 基于函数模型的伸缩因子

基于函数模型的伸缩因子即用某种特殊函数来表示伸缩的程度,常见的有:

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau + \varepsilon \tau > 0 \quad \varepsilon \text{ 为充分小的正数;}$$

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx^2} \quad \lambda \in (0,1) \quad k > 0;$$

$$\beta(t) = K_I \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad K_I \text{ 为比例常数。}$$

$\alpha(x)$ 表示输入变量论域的伸缩因子, $\beta(x)$ 表示输出变量论域的伸缩因子。

3.2 基于模糊规则的伸缩因子

相对于基于函数模型的伸缩因子用具体的函数来描述伸缩程度,基于模糊控制规则的伸缩因子则是选择易于表达的语言来描述。其基本思想如下:当输入变量(这里指 e 和 e_c)大时,为了不影响系统上升又不增加超调,其论域应保持不变;当输入变量小时,将其论域缩小,定义在论域上的模糊划分也随之压缩,使输入变量的可用规则增多,这就消除了模糊规则数量与控制精度的矛盾,增加了控制灵敏度及稳态精度。设输入变量 e 和 e_c 的伸缩因子分别为 α_1 和 α_2 ,则基于模糊规则的输入论域伸缩因子规则如表1所示。

表1 输入论域伸缩因子规则

| e/e_c | PB | PM | PS | Z | NS | NM | NB |
|---------------------|----|----|----|---|----|----|----|
| α_1/α_2 | B | M | S | Z | S | S | N |

其中B、M、S、Z表示论域“扩大或缩小的程度”。

对于输出论域伸缩因子 β 的取值,应由 e 和 e_c 共同决定,即根据 e 和 e_c 当前取值所反映的系统响应状态来确定输出论域改进型多大程度的扩大或者缩小。当 e 和 e_c 很大,且两者符号相同时,表明系统与设定值之间的差距很大,且系统正以很快的速度偏离设定值,这将使误差进一步扩大,此时应有较大的控制量将系统调节回来,使系统尽快跟踪设定值。因此 β 应取大些以使输出论域扩大。上述规律用规则表示如下:

如果 e 是PB且 e_c 是PB,则 β 为VB;如果 e 是NB且 e_c 是NB,则 β 为VB

当 e 和 e_c 很大,但两者符号相反时,表明系统与设定值之间的差距很大,但系统正以很快的速度靠近设定值,此时的控制量可以保持适当值,使系统既快速跟踪设定值又不产生较大的振荡。因此, β 应取小些以使输出论域有较小幅度的压缩。上述规律用规则表示如下:

如果 e 是PB且 e_c 是NB,则 β 为Z;如果 e 是NB且 e_c 是PB,则 β 为Z。

当 e 接近零而 e_c 很大时,表明系统与设定值之间的差距非常小,但系统正以很快的速度偏离设定值,此时控制量应较大以抑制系统偏离设定值的趋向。因此, β 应取较大的值以使输出论域有所扩大。上述规律用规则表示如下:

如果 e 是Z且 e_c 是NB,则 β 为B;如果 e 是Z且 e_c 是PB,则 β 为B。

类似地可以推导出 e 和 e_c 在各类情况下 β 的对应语言变量值。则基于模糊规则的输出论域伸缩因子规则如表 2 所示。

表 2 输出论域伸缩因子规则

| $E_c/\beta/E$ | NB | NM | NS | Z | PS | PM | PB |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | VB | VB | VB | B | SB | S | Z |
| NM | VB | VB | B | B | MB | S | VS |
| NS | VB | MB | B | VB | VS | S | VS |
| Z | S | SB | MB | Z | MB | SB | S |
| PS | VS | S | VS | VB | B | MB | VB |
| PM | VS | S | MB | B | B | VB | VB |
| PB | Z | S | SB | B | VB | VB | VB |

4 变论域自适应模糊逻辑实时整定 PID 控制

基于上述变论域思想,结合模糊逻辑实时整定 PID 控制器,本文提出了变论域自适应模糊逻辑实时整定 PID 控制器,其结构如图 1 所示。

变论域自适应模糊逻辑实时整定 PID 控制器的实质就是在模糊逻辑实时整定 PID 控制器的基础上加入变论域的思想,使得输入和输出的基本论域随着控制需求按照一定的准则进行实时自适应性伸缩变化,进而定义在基本论域上的模糊划分也随之变化,从而达到提高控制性能的作用。此型控制器实现的关键就在于确定论域伸缩的合理机制以及选择合适的伸缩因子,本文选择基于函数模型的伸缩因子。

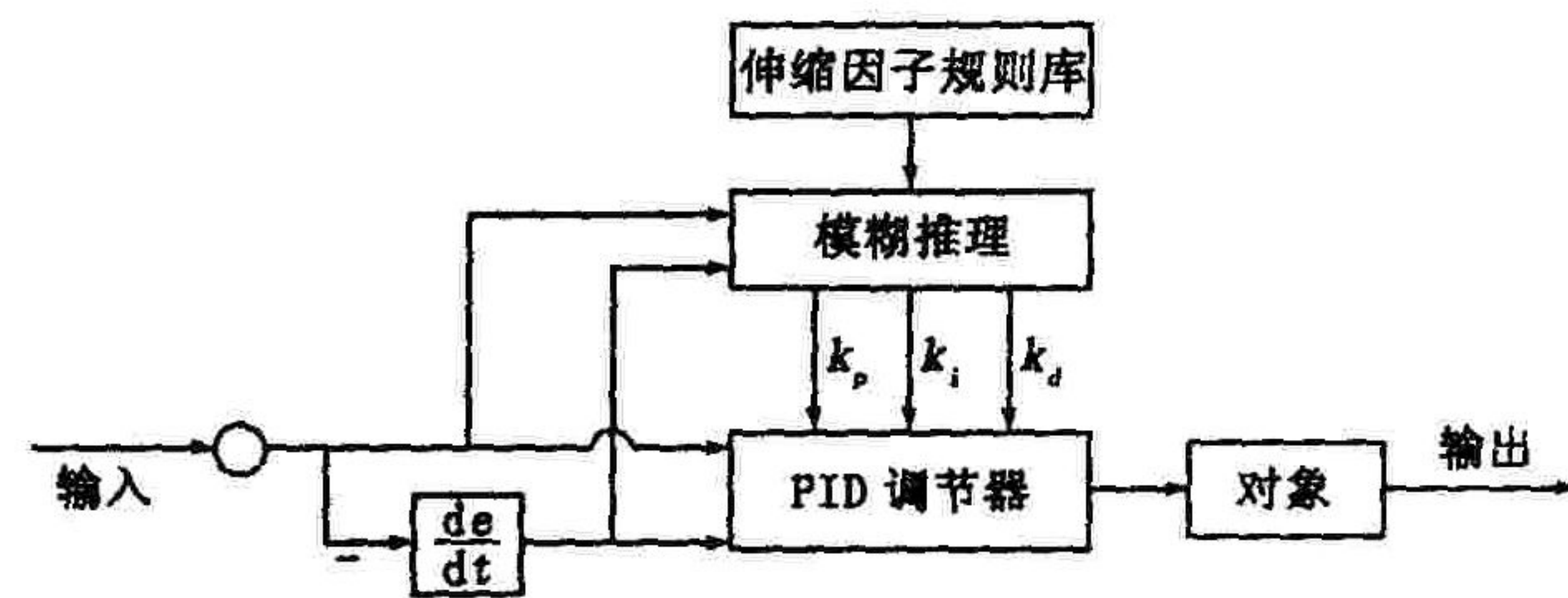


图 1 变论域自适应模糊逻辑实时整定 PID 控制器结构图

对于输入论域的伸缩因子,选用: $\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx^2}$ ($\lambda \in (0,1), k > 0$); 这里取 $\lambda = 0.6, k = 0.5$; x 表示输入变量 e 或 e_c 。亦即 $\alpha(e) = 1 - 0.6e^{-0.5e^2}, \alpha(e_c) = 1 - 0.6e^{-0.5e_c^2}$ 。

对于输出论域的伸缩因子,考虑 k_p, k_i 和 k_d 对控制性能的影响,采用原则:输出变量 k_p 和 k_d 的伸缩因子应具有与误差的单调一致性,而输出变量 k_i 的伸缩因子则具有与误差的单调反向性。亦即输出论域的伸缩因子应使得输出变量 k_p 和 k_i 适当大, k_d 适当小。为此选取输出变量 k_p 和 k_i 的论域伸缩因子为: $\beta_1 = 2|e|, \beta_2 = \frac{1}{|e| + 0.7}$; 亦即 $\beta_p = 2|e|, \beta_d = 2|e|, \beta_i = \frac{1}{|e| + 0.7}$ 。

5 仿真和分析

以某高阶非线性系统为例,采用上述变论域自适应模糊 PID 方法进行单位阶跃响应仿真。本文仅讨论了输入变量加入伸缩因子的情况,相应的输出变量也可加入伸缩因子。

仿真时间 0.8 s,在 0.6 s 处加入 3.0 V 干扰,输入、输出及误差曲线如图 2 所示;误差和误差变化率的伸缩因子随着时间进行变化的情况如图 3 所示;初始 k_p, k_i 和 k_d 随着时间的变化而变化以适应系统控制需求的情况如图 4 所示。从图中可看,伸缩因子提供了良好的自适应能力。

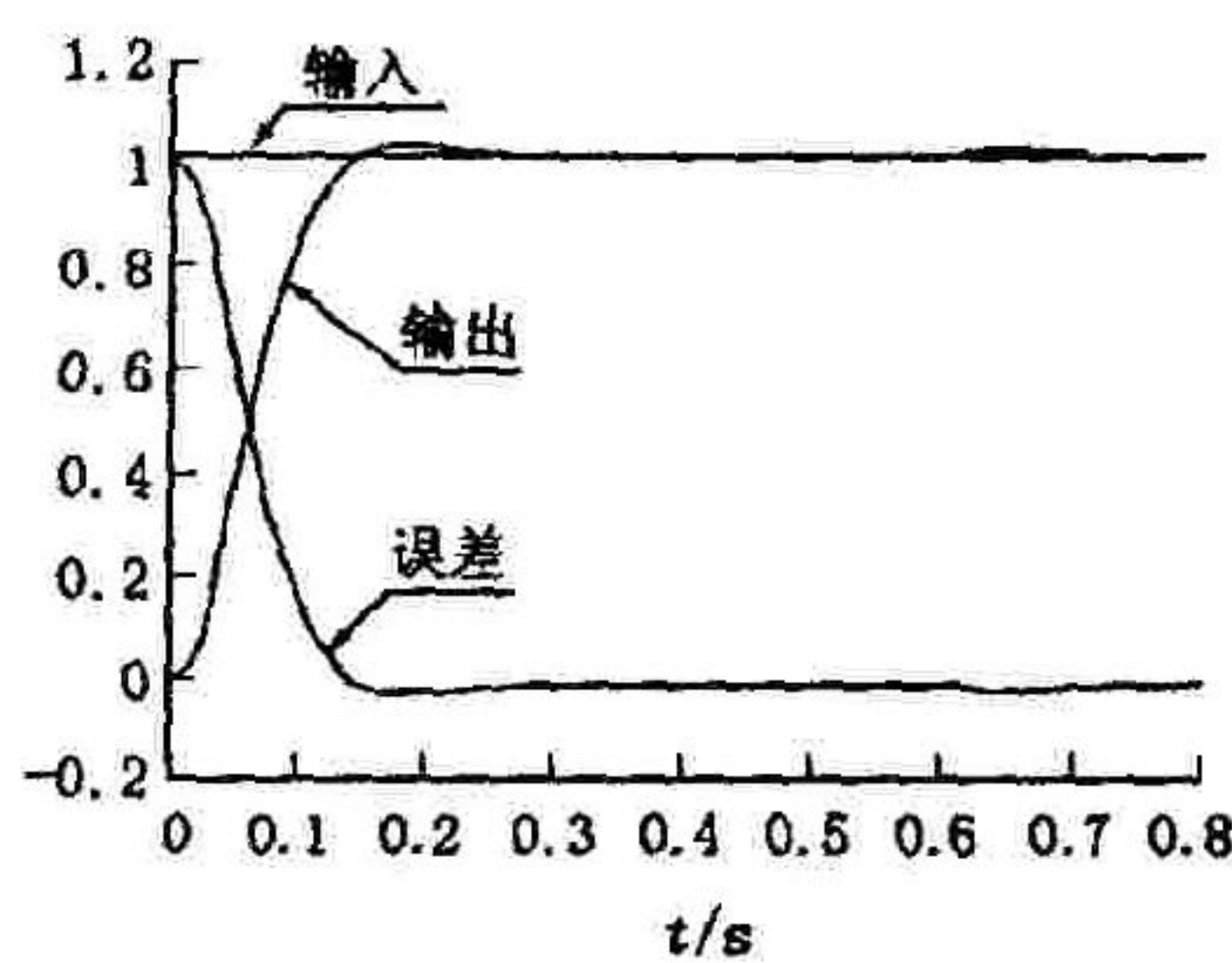


图 2 输入、输出误差图

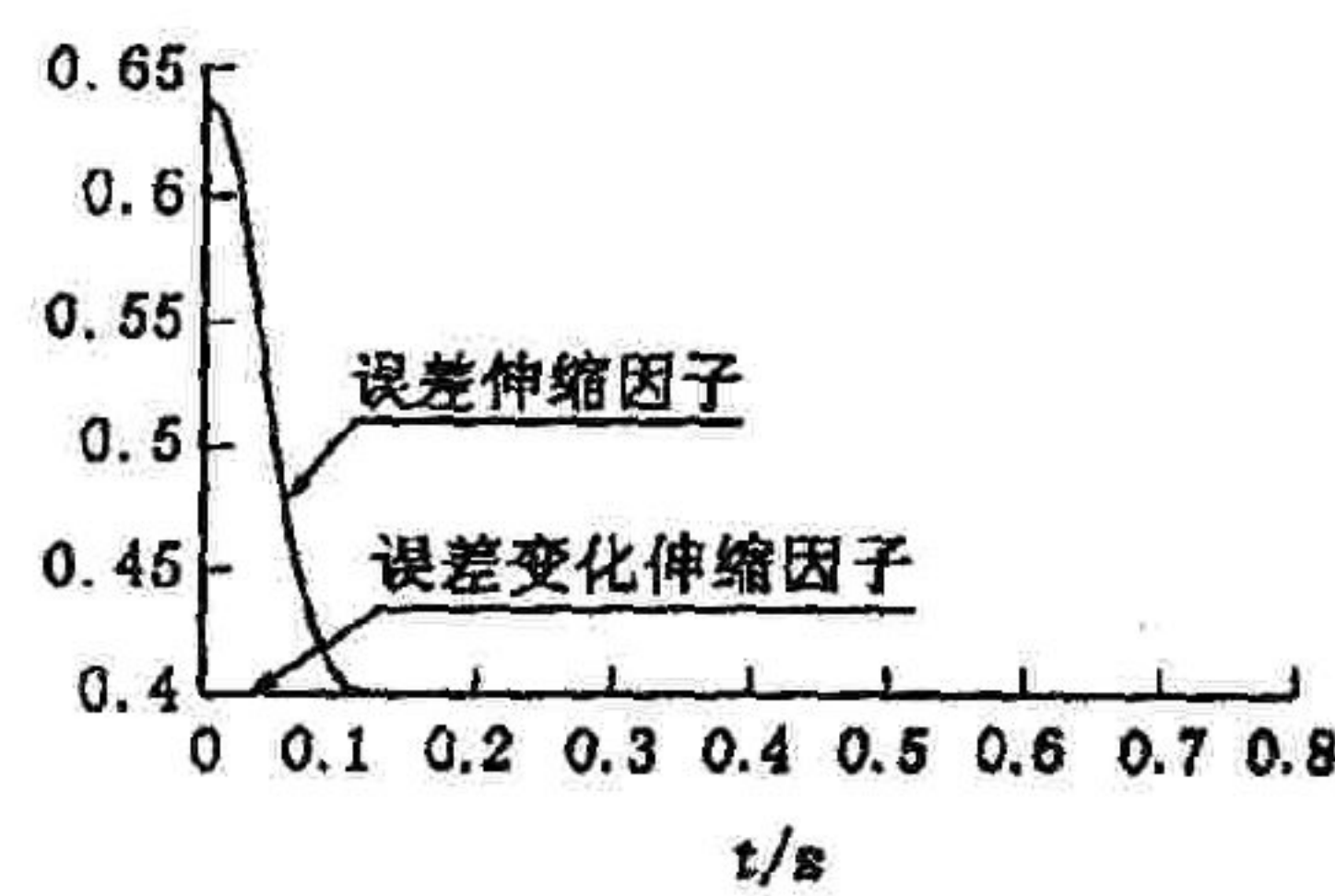


图 3 误差及误差变化率的伸缩因子变化图

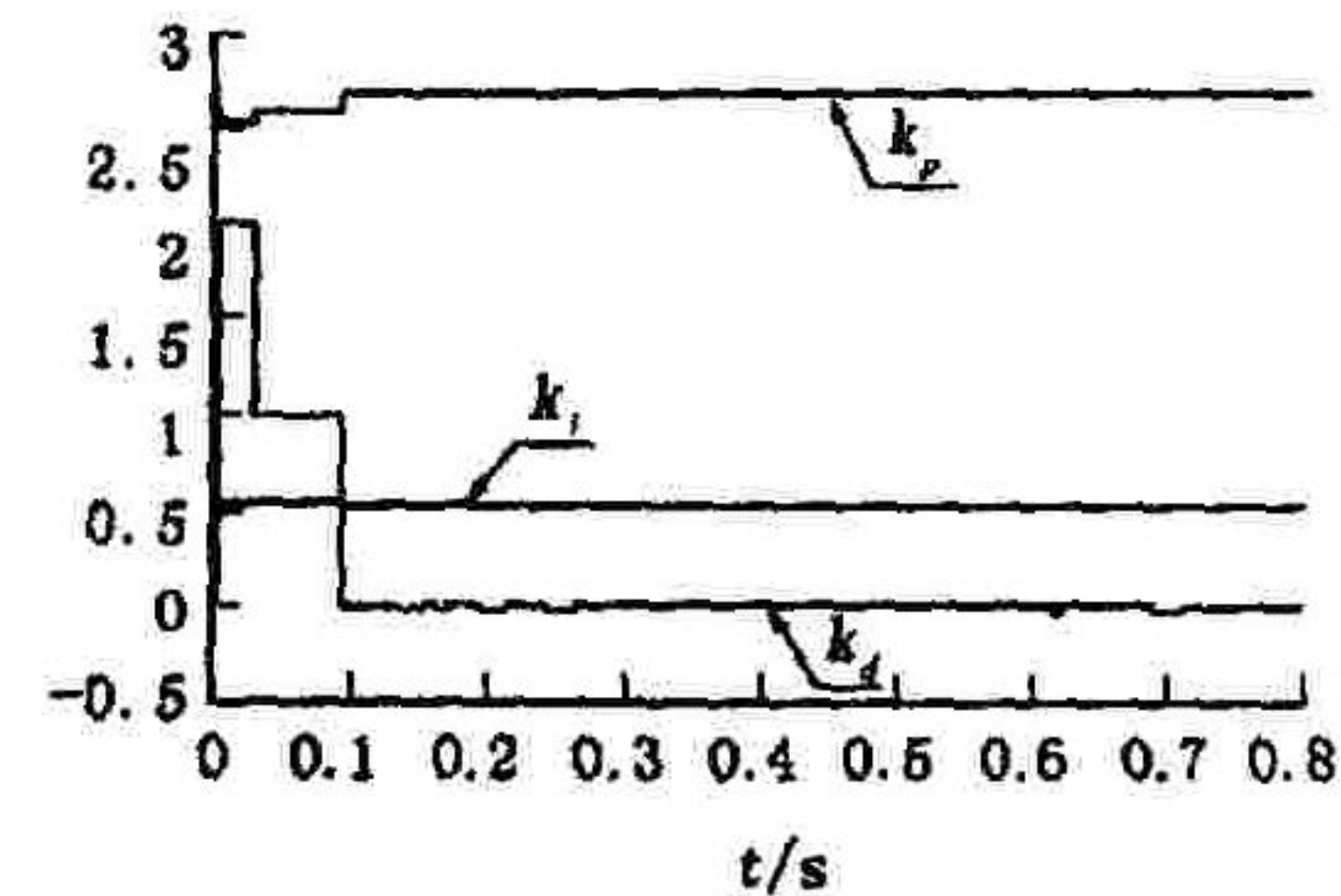


图 4 k_p, k_i, k_d 变化图

(下转第 32 页)