

# 分散 PID 组态模型及其应用<sup>\*</sup>

王启志 王永初

( 华侨大学机电工程系, 泉州 362011)

**摘要** 在对四种 PID 算式优缺点分析与比较的基础上, 提出一种功能分散的 PID 模型. 这种 PID 可以根据设计目标灵活地重构控制状态, 在自适应控制系统、SPC 系统和滑模系统中, 得到广泛的应用.

**关键词** 分散 PID 模型, 自适应控制, 滑模系统, PID 算式

**分类号** TP 273

近年来研究表明, PID 调节符合如下几点现代控制理论的设计原则<sup>[1]</sup>. (1) 鲁棒性原则. 过程控制对象  $G(S)$  构成的系统, 其开环传递函数  $H(S)$  满足  $H(\omega) < 1$ , 这个条件的前提是  $\tau_{\min} < \tau < \tau_{\max}$ ,  $K_{0m} < K_0 < K_{0M}$ ,  $T_{\min} < T < T_{\max}$ . 除非对象特性参数( $\tau, K_0, T$ ) 变化太大, 否则鲁棒条件经常是满足的. (2) 优化原则. 一个过程控制系统, 其对象特性可以用三阶惯性环节来描述, 按二次型最优原则选择的控制器正好是 PID. (3) 智能控制原则. PID 的三大作用功能较好地模拟人工操作, 尤其是不完全微分型 PID, 即  $D(S) = K_p(1 + 1/T_i S) \cdot [(T_d S + 1)/(T_d S/r + 1)]$  替代完全微分型 PID, 其模仿人工操作的动作更加逼真. 过程控制系统专家大量成熟的整定参数经验, 已有公式或图表置入 PID 模型, 实现过程的优化控制. 从这个意义上说, PID 调节也是一种小型的专家系统. 因此, 时至今日包括 DCS 系统<sup>[2]</sup>、先进数字控制系统的一些现代化控制系统, 都将 PID 作为基础级控制模式. PID 调节仍然具有广阔的应用前途.

## 1 PID 功能分散

工业过程数字控制系统的控制算式, 差不多是由如下三种 PID 连续模型变换得到的.

(1) 完全微分型 PID

$$D(S) = K_p(1 + 1/T_i S + T_d S). \quad (1)$$

(2) 类不完全微分型 PID

$$D(S) = K_p[1 + 1/T_i S + T_d S/(T_d S/r + 1)]. \quad (2)$$

(3) 类不完全微分型 PID

$$D(S) = K_p(1 + 1/T_i S)[(T_d S + 1)/(T_d S/r + 1)]. \quad (3)$$

对连续 PID 模型进行 Z 变换, 如式(3) 变换为

$$D(Z^{-1}) = Z\{D(S)\} = Z\{K_p(1 + 1/T_i S)[(T_d S + 1)/(T_d S/r + 1)]\}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\frac{K_p}{T_i} \{ 1 + (1-r)(1-rT_i/T_D) \} - e^{-\Delta T r/T_D} + (1-r)(1-rT_i/T_D) Z^{-1}}{(1-Z^{-1})(1-e^{-\Delta T r/T_D} Z^{-1})} \\
&= (\beta_1 - \beta_2 Z^{-1}) / (1 - \alpha Z^{-1} + \alpha Z^{-2}) \triangleq u(Z^{-1}) / e(Z^{-1}), \quad (4)
\end{aligned}$$

其中  $\beta_1 = K_p [1 + (1-r)(1-rT_i/T_D)] / T_i$ ,  $\beta_2 = K_p [e^{-\Delta T r/T_D} + (1-r)(1-rT_i/T_D)] / T_i$ ,  $\alpha = 1 + e^{-\Delta T r/T_D}$ ,  $\alpha$  与  $\beta_2$  同时受  $K_p, r, T_i$  与  $T_D$  的影响. 因此算式

$$u_n = \alpha_1 u_{n-1} - \alpha_2 u_{n-2} + \beta_1 e_n - \beta_2 e_{n-1} \quad (5)$$

的参数(即系数  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  与  $\beta_2$ ) 整定很不容易. 式(1), (2) 的模型, 同样存在这个问题.

但是在工程中, 多数采用式(1)的模型. 式(1)的模型的微分冲击太甚, 不利于平稳控制, 其缺点早有定论, 但至今仍广泛被采用. 原因在于它简单易行, 有工程化的优点, 采用差分方法就可以得到

$$u_n = u_{n-1} + \beta_1 e_n - \beta_2 e_{n-1} + \beta_3 e_{n-2}, \quad (6)$$

式中  $\beta_1 = K_p(1 + \Delta T / T_i + T_d / \Delta T)$ ,  $\beta_2 = K_p(1 + 2T_d / \Delta T)$ ,  $\beta_3 = K_p T_d / \Delta T$ .

一种P, I与D功能分散可组态的PID模型如图1所示. 其中虚线框内的部份为积分外

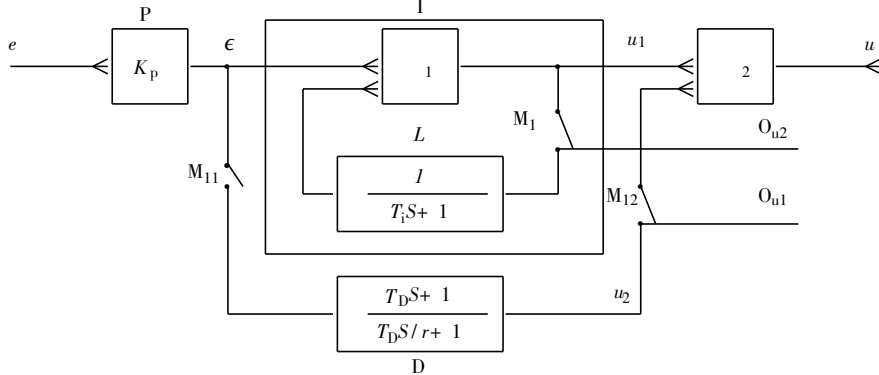


图1 功能分散的PID结构

反馈型的I模型, 当软开关  $M_2$  闭合时有

$$\frac{u_1(S)}{\epsilon(S)} = \frac{1}{1 - 1/(T_i S + 1)} = 1 + \frac{1}{T_i S}; \quad (7)$$

而当所有的软开关均闭合时

$$u(S) = u_1(S) + u_2(S) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_i S} + \frac{T_D S + 1}{T_D S / r + 1} \right\} \epsilon(S). \quad (8)$$

由于P, I与D功能分散整合, 式(8)的形式与式(2)一致, 同样实行PID调节. 但算式却有明显不同. 图1结构的PID算式包括

$$\left. \begin{aligned}
\epsilon(Z^{-1}) &= K_p e(Z^{-1}), \\
u^{(1)}(Z^{-1}) &= z \left( 1 + \frac{1}{T_i S} \right) e(Z^{-1}) = \frac{1/T_i e(Z^{-1})}{1 - Z^{-1}}, \\
u^{(2)}(Z^{-1}) &= z \left( \frac{T_D S + 1}{T_D S / r + 1} \right) e(Z^{-1}) = \frac{(1-r)e(Z^{-1})}{1 - e^{-\Delta T r/T_D}}, \\
u(Z^{-1}) &= u^{(1)}(Z^{-1}) + u^{(2)}(Z^{-1}).
\end{aligned} \right\} \quad (9)$$

即实行如下的迭代运算

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_n &= K_p e_n, \\ u_n^{(1)} &= \alpha_1 u_{n-1}^{(2)} + \beta_1 e_n, \\ u_n^{(2)} &= \alpha_1 u_{n-1}^{(2)} + \beta_2 e_n, \\ u_n &= u_n^{(1)} + u_n^{(2)}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中  $\beta_1 = 1/T_i$ ;  $\alpha = e^{-\Delta T/T_D}$ ;  $\beta_2 = (1-r)$ . 通常  $r$  为常数(约为  $10 \sim 20$ ), 因此  $K_p$ ,  $\beta_1$  与  $\beta_2$  均为 PID 整定参数( $K_p$ ,  $T_i$  或  $T_D$ )的单一函数. 模拟 PID 整定参数的公式可以移植到数字控制系统直接应用, 这是 P, I 和 D 控制功能分散的一个优点. 这种功能模型的另一个重要优点是: 为 PID 实施自整定提供更加容易实现的 PID 调节结构. 例如被控对象为  $G(S) = K_0 e^{-\tau}/TS + 1$ , 当  $r$  较大( $r = 20$ )时, 则式(8)近似为

$$D(S) = K_p(2 + 1/T_i S + T_D S) = K_p^*(1 + 1/T_i^* S + T_D^* S), \quad (11)$$

其中  $K_p^* = 2K_p$ ,  $K_i^* = 2T_i$ ,  $T_D^* = T_D/2$ . 式(11)同式(2)一样, 为完全微分型 PID, 专家整定经验为  $K_p^* = 1.2T/K_0\tau$ ,  $T_i^* = 2\tau$ ,  $K_D^* = 0.42\tau$ , 故知  $K_p = K_p^*/2 = 0.6T/K_0\tau$ ,  $T_i = T_i^*/2 = \tau$ ,  $T_D = 2T_D^* = 0.82\tau$ . 当对象特性参数( $K_0$ ,  $\tau$ 与 $T$ )辨识以后, 则可按上述方法求出  $K_p$ ,  $T_i$  与  $T_D$ , 并进一步求出式(10)的模型系数  $\beta_1$ ,  $\alpha_1$  与  $\beta_2$ . 只要  $K_0$ ,  $\tau$ 与 $T$  可以在线辨识, 在对象特性变化以后, 就可以及时调整模型系数, 达到 PID 的自整定. 采用滚动模型辨识方法<sup>[1]</sup>, 一般可以较准确地确定  $G(S)$  的特性参数  $K_0$ ,  $\tau$ 与 $T$ .

## 2 分散 PID 功能模型的组态应用

### 2.1 滑模控制系统

在过程系统中, 由于对象特性在若干运行区域内变异较大, 或者系统外条件改变要求控制器的结构随之变化<sup>[1]</sup>. 依据运引条件, 控制器在 PI—PID—PI 结构滑动, 或在 P—PI—PID 之间滑动, 功能分组的 PID 容易达到. 例如, 图 1 开关  $M_{11}$  闭合,  $M_{12}$  断开,  $M_2$  闭合, 则构成一个 PI 结构. 若此时  $M_2$  断开,  $O_{u2}$  接系统外一种相关信号, 则构成一个抗积分饱和的 PI 结构. 假如再将  $M_{12}$  闭合, 则成为一种抗积分饱和的 PID 结构. 附表列出图 1 结构的几种调节功能.

附表 图 1 结构的几种功能<sup>①</sup>

序号	开断及 $O_{ui}$ 状态					功 能
	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_2$	$O_{u1}$	$O_{u2}$	
1	√	√	√	×	×	PID
2	√	√	×	×	√	抗积分饱和 PID
3	×	×	×	×	×	P
4	×	×	√	×	×	PI
5	×	×	×	×	√	抗积分饱和 PI
6	√	×	√	×	√	微分先行 PID
7	√	×	×	√	√	抗积分饱和及微分先行

① “√”为开关闭合或  $O_{ui}$  外接信号, “×”为开关断开或没有接  $O_{ui}$  的外信号

### 2.2 自整定 PID 系统

鲁棒控制可以在对象参数一定范围内变化, 达到稳定调节的目标. PID 调节对参数小范围变化具有本质的鲁棒性<sup>[1]</sup>. 但当参数变化范围较大时, 可以采用图 2 所示的自整定 PID 系统结构. 由于 P, I 和 D 三个控制功能模型分离, 系统三个整定参数( $K_p$ ,  $T_i$ 与 $T_D$ ) 互为独立无

关,为自整定提供了可能性. 辨识模型  $\hat{G}(S)$  是通过测试对象  $G(S)$  的输入与输出数据,再由数据拟合法求得的. 根据  $z\{G(S)\} = z\left\{\frac{K_0 e^{-\tau S}}{T S + 1}\right\} = \frac{k_0 Z^{-m/T}}{1 - e^{-\Delta T/T} Z^{-1}} \triangleq \frac{y(Z^{-1})}{u(Z^{-1})}$ , 可得

$$y^n = \varphi y_{n-1} + \varphi_2 u_{n-m}, \quad (12)$$

其中  $\varphi = e^{-\Delta T/T}$ ;  $\varphi_2 = K_0/T$ ,  $m = \tau/\Delta T$ . 由实测数据  $(y_i, y_{i+1}, \dots, y_n)$  与  $(u_{i-m}, u_{i+1-m}, \dots, u_{n-m})$ ,

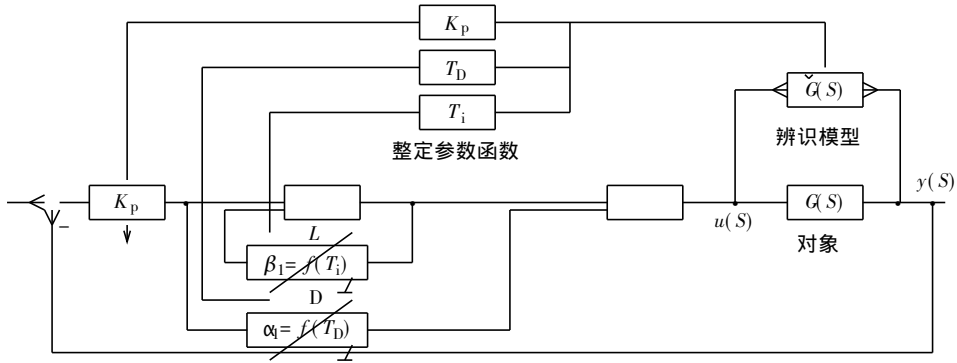


图2 自整定PID系统

在  $m$  值已知情况下,采用最小二乘法不难求出式(12)的模型系数  $\varphi(m)$  与  $\varphi_2(m)$ . 若  $m$  值前后滚动,三次求出的  $\varphi(m)$  与  $\varphi_2(m)$  值,取其中模型误差平方和最小的那一次作为辨识结果. 可得  $\tau = m\Delta T$ ,  $T = -\Delta T/\ln \varphi$ ,  $K_0 = T\varphi_2 = -T\Delta T/\ln \varphi$ , 其中  $\Delta T$  为系统的采样周期.

自整定 PID 调节同滑模调节一样大大扩大 PID 的应用范围.

## 参 考 文 献

- 1 Morari M. Robust stability of system with integral control. IEEE, A-C 30, 1985, (4): 562~572
- 2 施敏芳. 可编程控制器在生产流水线控制系统中的应用. 华侨大学学报(自然科学版), 1995, 16(3): 301~307
- 3 王永初, 陈庄金, 李钟慎. 现代控制工程设计基础. 广州: 暨南大学出版社, 1997. 105~108
- 4 Laughlin D L. Internal model control and process uncertainty. Int. J. Control, 1986, 44(8): 845~873

## A Decentralized Proportional-Plusintegral-Plusderivative (PID) Configuration Model and Its Application

Wang Qizhi      Wang Yongchu

(Dept. of Mech. & Electr. Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** Based on analysis and comparison of strong and weak points of four kinds of proportional-plusintegral-plusderivative (PID) algorithms, the authors advance a functional decentralized PID model by which the control mode can be flexibly reconfigured in line with design objective. This PID model has been widely applied to adaptive control system, set point control system and sliding mode system.

**Keywords** dedntralized PID model, adaptive control, sliding mode system, PID algorithm