



# 第11章 CPS中的控制技术

11.1、自动控制系统基本概念

11.2、自动控制系统数学模型

**11.3、PID控制技术**

11.4、PID控制器整定技术

11.5、其它先进控制技术



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例积分微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它

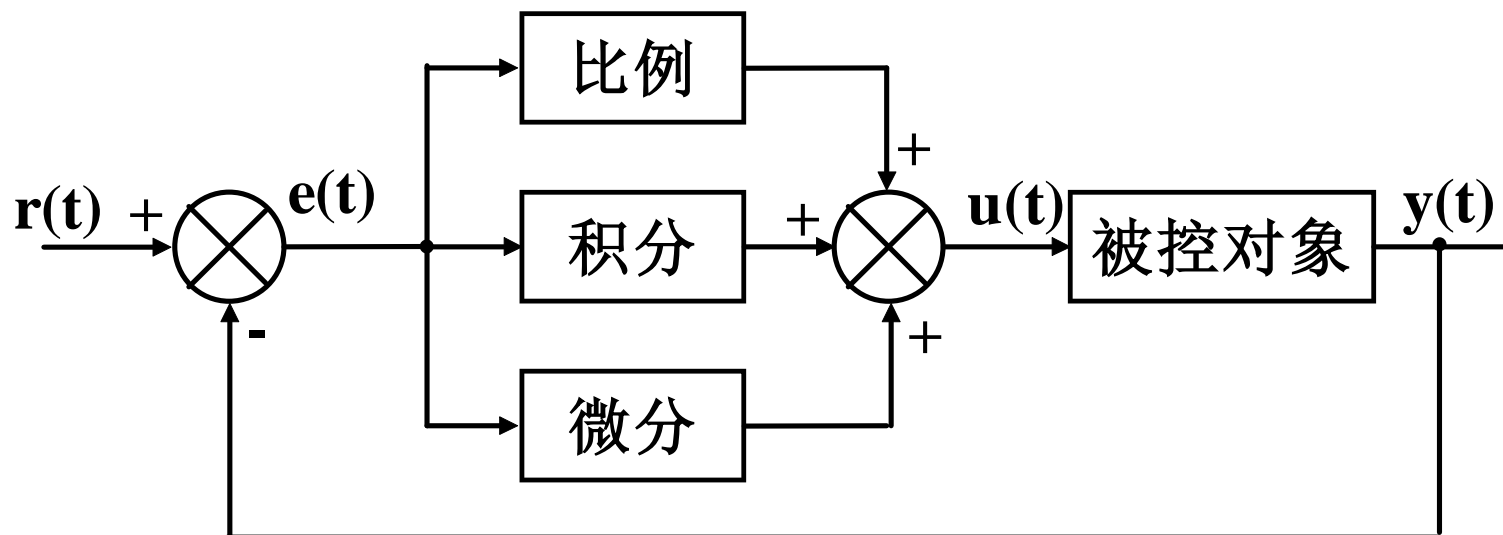


## 11.3.1 什么是PID

- 在过程控制中，按偏差的比例**P**、积分**I**和微分**D**进行控制的**PID**控制器（亦称**PID**调节器）是应用最为广泛的一种自动控制器。它具有原理简单，易于实现，适用面广，控制参数相互独立，参数的选定比较简单等优点；而且在理论上可以证明，对于过程控制的典型对象——“一阶滞后+纯滞后”与“二阶滞后+纯滞后”的控制对象，**PID**控制器是一种最优控制。**PID**调节规律是连续系统动态品质校正的一种有效方法，它的参数整定方式简便，结构改变灵活（**PI**、**PD**、...）。

# 何为PID

- PID是比例、积分、微分的缩写，将偏差的比例P、积分I和微分D通过线性组合构成控制量，用这一控制量对被控对象进行控制，这样的控制器称PID控制器。



PID算法控制原理

•



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例积分微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它



## 11.3.2 PID调节器的优点

- PID调节器之所以经久不衰，主要有以下优点。
- 1) . 技术成熟
- 2) . 易被人们熟悉和掌握
- 3) . 不需要建立数学模型
- 4) . 控制效果好



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- **11.3.3 PID的类型**
- 11.3.4 比例积分微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它



## 11.3.3 PID调节器的类型

- 1) . 比例、积分、微分调节器
- 2) . 比例积分调节器
- 3) . 比例微分调节器
- 4) . 比例积分微分调节器





## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- **11.3.4 比例、积分、微分调节器**
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它



## 11.3.4 比例调节器

- 比例调节器的微分方程为：
- $y = K_p e(t)$
- 式中：  $y$  为调节器输出；  $K_p$  为比例系数；  $e(t)$  为调节器输入偏差。
- 由上式可以看出，调节器的输出与输入偏差成正比。因此，只要偏差出现，就能及时地产生与之成比例的调节作用，具有调节及时的特点。比例调节器的特性曲线，如图1所示。

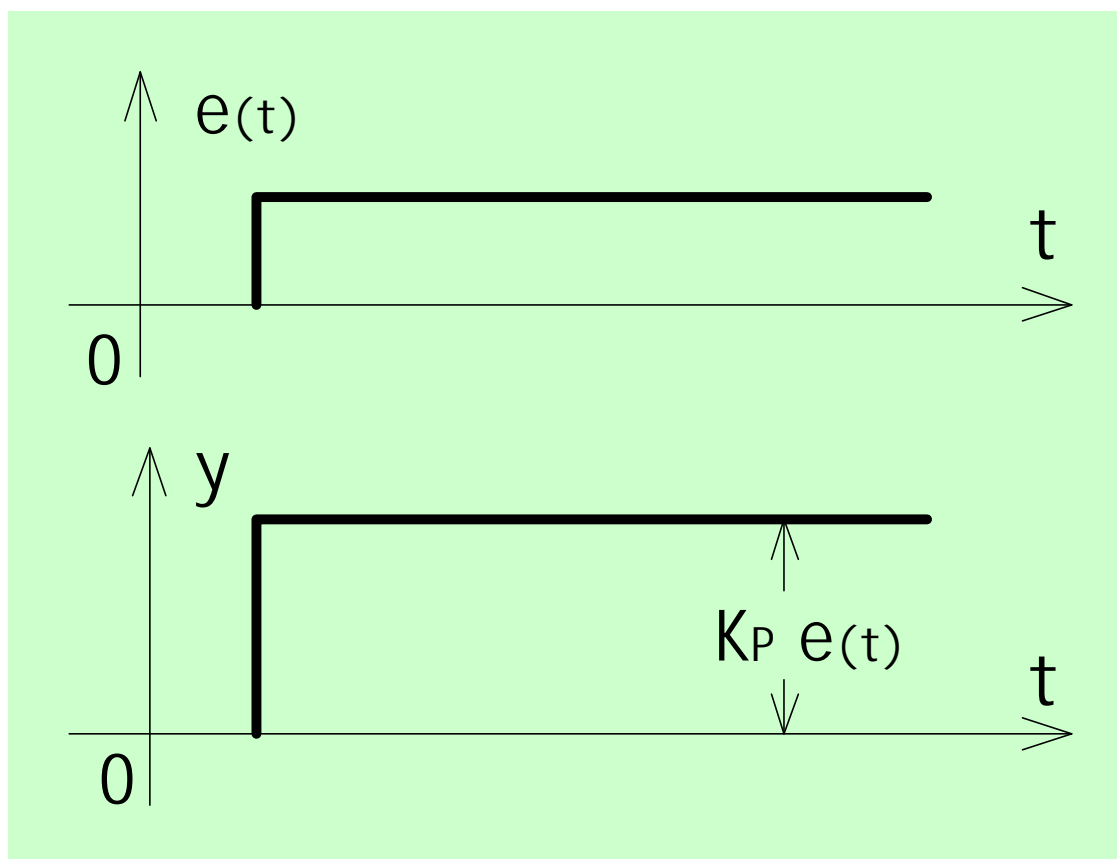


图1 阶跃响应特性曲线



## 11.3.4 积分调节器

- 所谓积分作用是指调节器的输出与输入偏差的积分成比例的作用。积分方程为：

$$y = \frac{1}{T_I} \int e(t) dt$$

- 式中： $T_I$ 是积分时间常数，它表示积分速度的大小， $T_I$ 越大，积分速度越慢，积分作用越弱。积分作用的响应特性曲线，如图2所示。
  - 对于一个自动控制系统，如果为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小，直到等于零。

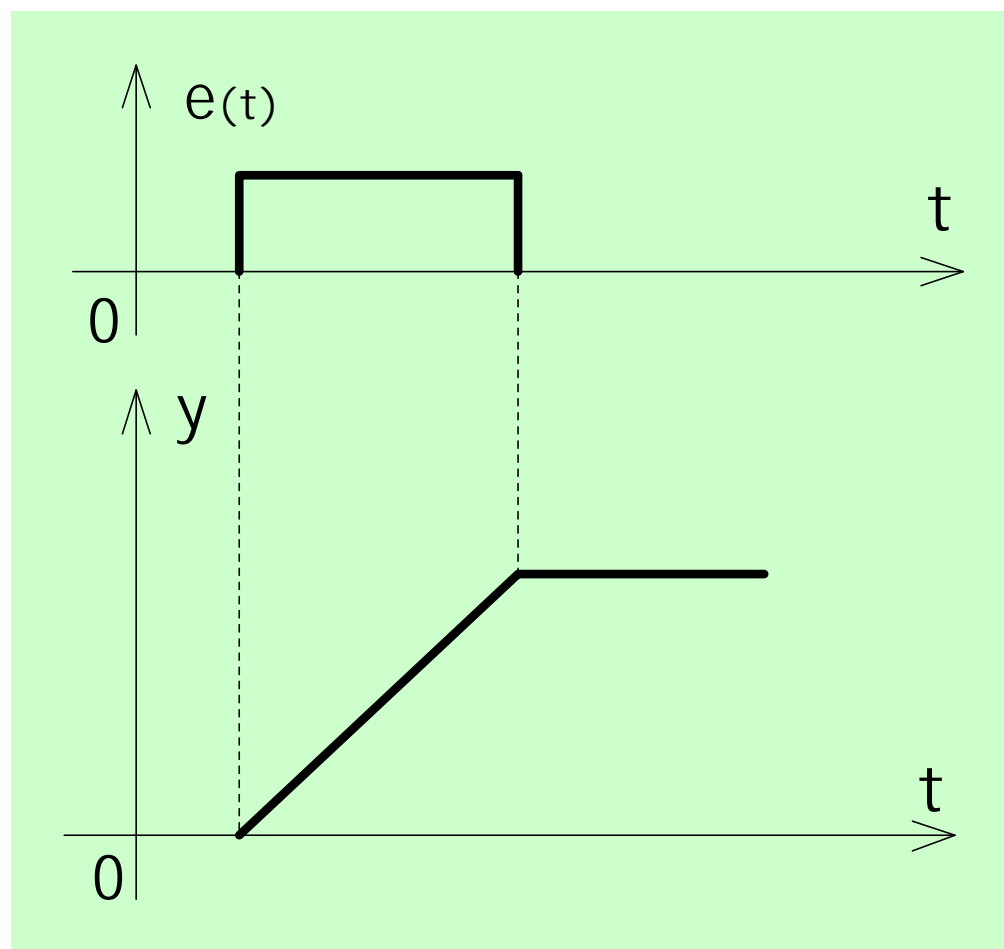


图2积分作用响应曲线

## 11.3.4 微分调节器

- 在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后(delay)组件，具有抑制误差的作用，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。这就是说，在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势，这样，具有比例+微分的控制器，就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。



## 11.3.4 微分调节器

- 微分调节器的微分方程为：

- $$y = T_D \frac{de(t)}{dt}$$

- 微分作用响应曲线如图4所示。

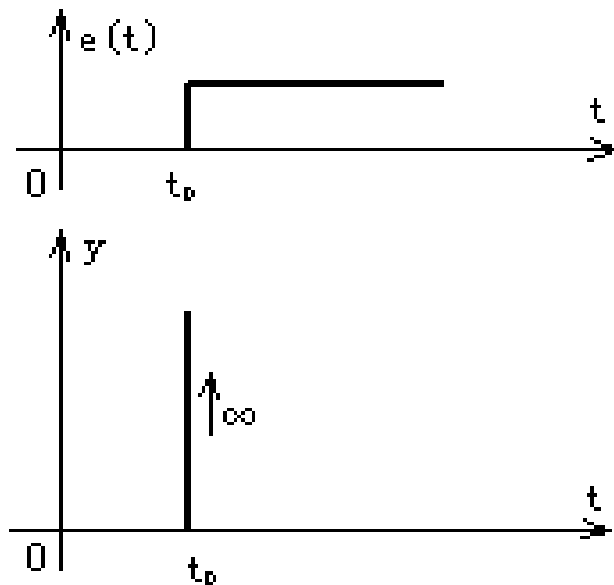


图4 微分调节器



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例、积分、微分调节器
- **11.3.5 比例积分调节器**
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它





## 11.3.5 比例积分调节器

- 若将比例和积分两种作用结合起来，就构成**PI**调节器，调节规律为：

- 

$$y = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right]$$

- **PI**调节器的输出特性曲线如图5所示

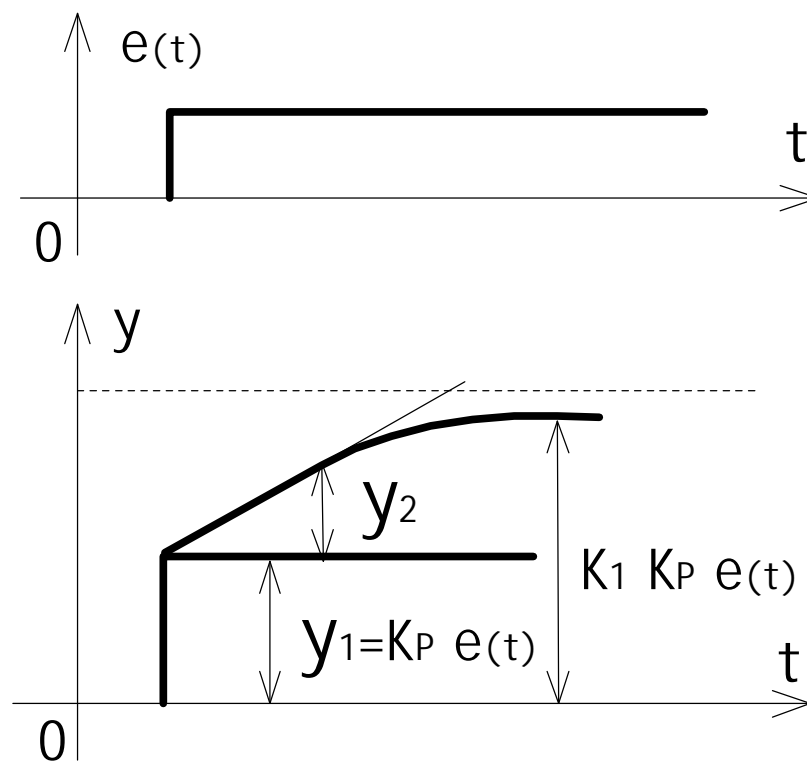


图5 PI调节器的输出特性曲线



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例、积分、微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- **11.3.6 比例微分调节器**
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它



## 11.3.6 比例微分调节器

- PD调节器的阶跃响应曲线如图6所示。

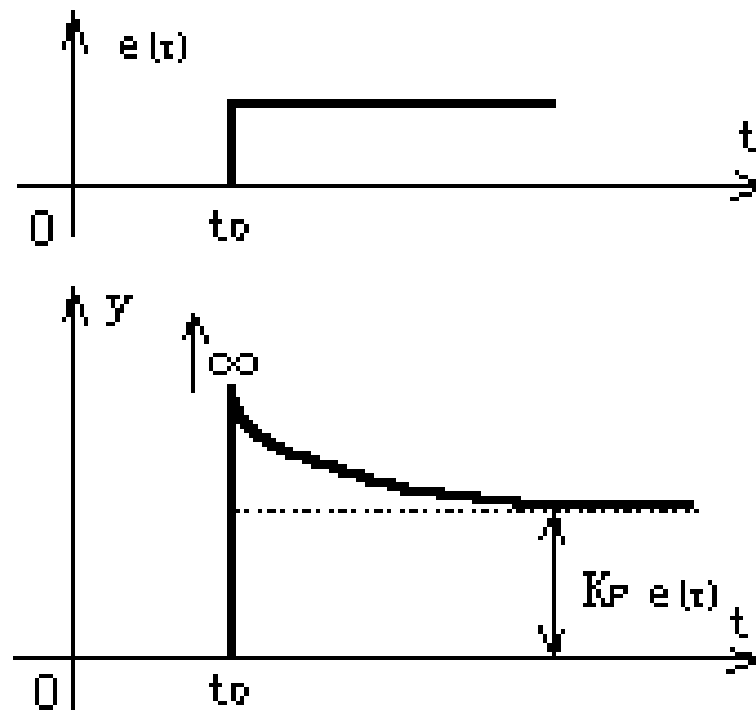


图6 PD比例微分调节器



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例、积分、微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- **11.3.7 比例积分微分调节器**
- 11.3.8 其它



## 11.3.7 比例积分微分调节器

- 为了进一步改善调节品质，往往把比例、积分、微分三种作用组合起来，形成**PID**调节器。理想的**PID**微分方程为：

$$y = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

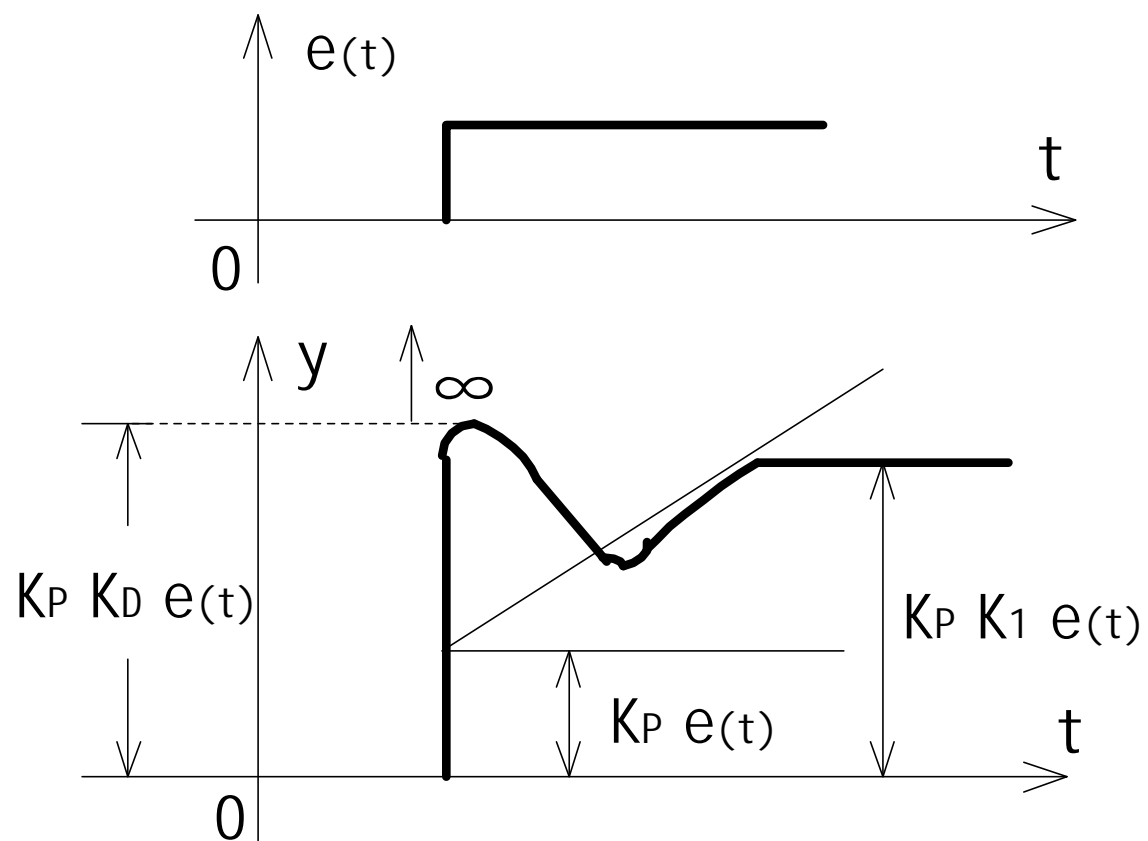


图7 PID调节器对阶跃响应特性曲线



## 11.3 PID控制技术

- 11.3.1 什么是PID
- 11.3.2 PID优点
- 11.3.3 PID的类型
- 11.3.4 比例、积分、微分调节器
- 11.3.5 比例积分调节器
- 11.3.6 比例微分调节器
- 11.3.7 比例积分微分调节器
- 11.3.8 其它



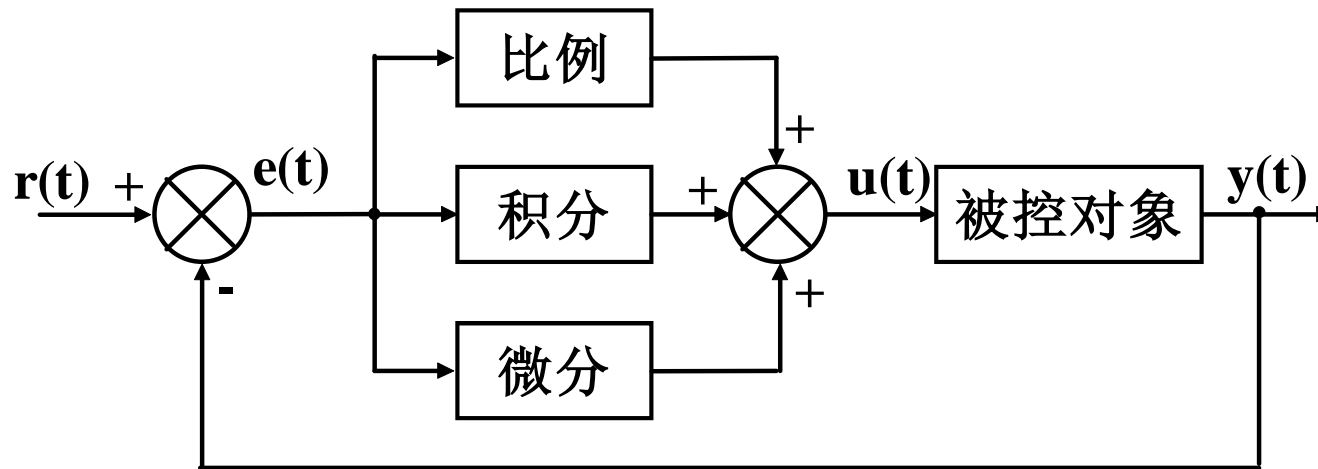


# PID参数选定规则

整定参数寻最佳, 从小到大逐步查;  
先调比例后积分, 微分作用最后加;  
曲线震荡很频繁, 比例刻度要放大;  
曲线漂浮波动大, 比例刻度要拉小;  
曲线偏离回复慢, 积分时间往小降;  
曲线波动周期长, 积分时间要加长;  
曲线震荡动作繁, 微分时间要加长.

# 模拟PID控制原理

- 模拟PID控制系统原理图如下图所示。



- 该系统由模拟PID控制器和被控对象组成。图中， $r(t)$  是给定值， $y(t)$  是系统的实际输出值，给定值与实际输出值构成控制偏差  $e(t)$ ，有  $e(t) = r(t) - y(t)$
- $e(t)$  作为PID控制器的输入， $u(t)$  作为PID控制器的输出和被控对象的输入。



- 所以模拟**PID**控制器的控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u_o$$

- 其中： $u(t)$ ——调节器的输出信号；
- $e(t)$ ——调节器的偏差信号，它等于给定值与测量值之差
- $K_p$ ——比例系数
- $T_I$ ——积分时间
- $T_D$ ——微分时间
- $u_0$ ——控制常量
- $K_p / T_I$ ——积分系数
- $K_p / T_D$ ——微分系数



- 比例环节的作用是对偏差瞬间做出快速反应。偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，使控制量向减少偏差的方向变化。控制作用的强弱取决于比例系数 $K_p$ ， $K_p$ 越大，控制越强，但过大的 $K_p$ 会导致系统震荡，破坏系统的稳定性。



- 积分环节的作用是把偏差的积累作为输出。在控制过程中，只要有偏差存在，积分环节的输出就会不断增大。直到偏差 $e(t)=0$ ，输出的 $u(t)$ 才可能维持在某一常量，使系统在给定值 $r(t)$ 不变的条件下趋于稳态。积分环节的调节作用虽然会消除静态误差，但也会降低系统的响应速度，增加系统的超调量。积分常数 $T_I$ 越大，积分的积累作用越弱。增大积分常数 $T_I$ 会减慢静态误差的消除过程，但可以减少超调量，提高系统的稳定性。所以，必须根据实际控制的具体要求来确定 $T_I$ 。



- 微分环节的作用是阻止偏差的变化。它是根据偏差的变化趋势（变化速度）进行控制。偏差变化得越快，微分控制器的输出越大，并能在偏差值变大之前进行修正。微分作用的引入，将有助于减小超调量，克服震荡，使系统趋于稳定。但微分的作用对输入信号的噪声很敏感，对那些噪声大的系统一般不用微分，或在微分起作用之前先对输入信号进行滤波。适当地选择微分常数 $T_D$ ，可以使微分的作用达到最优。



# PID控制算式的数字化

- 由于计算机的出现，计算机进入了控制领域。人们将模拟**PID** 控制规律引入到计算机中来。由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样许可的偏差计算控制量，而不能象模拟控制那样连续输出控制量，进行连续控制。由于这一特点，公式

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u_o$$

中的积分和微分项不能直接使用，必须进行离散化处理。离散化处理的方法为：以 $T$ 作为采样周期， $k$ 作为采样序号，则离散采样时间 $kT$ 对应着连续时间 $t$ ，用求和的形式代替积分，用增量的形式代替微分，可作如下近似变换：



$$\left. \begin{aligned} t &\approx kT & k &= (0,1,2,3,\dots) \\ \int_0^t e(t)dt &\approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e_j \\ \frac{de(t)}{dt} &\approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \end{aligned} \right\}$$

- 上式中，为了表示方便，将类似于 $e(kT)$ 简化成 $e_k$ 形式就可以得到离散的PID表达式：

$$u_k = K_P \left[ e_k + \frac{T}{T_1} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_D}{T} (e_k - e_{k-1}) \right] + u_o$$





- 或写成

$$u_k = K_P e_k + K_I \sum_{j=0}^k e_j + K_D (e_k - e_{k-1}) + u_0$$

- 式中：  $k$  ——采样信号，  $k=0,1,2,\dots$
- $u_k$  ——第  $k$  次采样时刻的计算机输出值
- $e_k$  ——第  $k$  次采样时刻输入的偏差值
- $e_{k-1}$  ——第  $k-1$  次采样时刻输入的偏差值
- $K_I$  ——积分系数（积分时间  $T_I$  即为累积多少次/个  $T$ ）
- $K_D$  ——微分系数
- $u_0$  ——开始进行 **PID** 控制时的原始初值（应为前一次的给定值）
- 如果采样周期取得足够小，则以上近似计算可获得足够精确的结果，离散控制过程与连续控制过程十分接近。



# PID控制算式的数字化

- 在编程时，可写成：
- $U_o(n) = P * e(n) + I * [e(n) + e(n-1) + \dots + e(0)] + D * [e(n) - e(n-1)]$
- **P**-----改变**P**可提高响应速度，减小静态误差，但太大会增大超调量和稳定时间。  
**I**-----与**P**的作用基本相似，但要使静态误差为**0**，必须使用积分。  
**D**-----与**P**,**I**的作用相反，主要是为了减小超调，减小稳定时间。
- $e(n)$ -----本次误差
- $e(n) + e(n-1) + \dots + e(0)$ -----所有误差之和
- $e(n) - e(n-1)$ -----控制器输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率），具有预见性，能预见偏差变化的趋势，因此能产生超前的控制作用，在偏差还没有形成之前，已被微分调节作用消除。因此，可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适情况下，可以减少超调，减少调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的加微分调节，对系统抗干扰不利。



- 三个参数要综合考虑，一般先将 $I, D$ 设为0，调好 $P$ ,达到基本的响应速度和误差，再加上 $I$ ,使误差为0，这时再加入 $D$ ,三个参数要反复调试，最终达到较好的结果。不同的控制对象，调试的难度相差很大！



- 在PID参数进行整定时如果能够有理论的方法确定PID参数当然是最理想的方法，但是在实际的应用中，更多的是通过凑试法来确定PID的参数。
- 增大比例系数 $P$ 一般将加快系统的响应，在有静差的情况下有利于减小静差，但是过大的比例系数会使系统有比较大的超调，并产生振荡，使稳定性变坏。
- 增大积分时间 $I$ 有利于减小超调，减小振荡，使系统的稳定性增加，但是系统静差消除时间变长。
- 增大微分时间 $D$ 有利于加快系统的响应速度，使系统超调量减小，稳定性增加，但系统对抗动的抑制能力减弱。



- 微分是即误差的变化率，具有预见性，能预见偏差变化的趋势，因此能产生超前的控制作用，在偏差还没有形成之前，已被微分调节作用消除。因此，可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适情况下，可以减少超调，减少调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的加微分调节，对系统抗干扰不利。



- 然后将已经调节好的比例系数略为缩小(一般缩小为原值的**0.8**)，然后减小积分时间，使得系统在保持良好动态性能的情况下，静差得到消除。在此过程中，可根据系统的响应曲线的好坏反复改变比例系数和积分时间，以期得到满意的控制过程和整定参数。
- 如果在上述调整过程中对系统的动态过程反复调整还不能得到满意的结果，则可以加入微分环节。首先把微分时间**D**设置为**0**，在上述基础上逐渐增加微分时间，同时相应的改变比例系数和积分时间，逐步凑试，直至得到满意的调节效果。



- PID的参数设置可以参照以下来进行:

参数整定找最佳，从小到大顺序查  
先是比例后积分，最后再把微分加  
曲线振荡很频繁，比例度盘要放大  
曲线漂浮绕大湾，比例度盘往小扳  
曲线偏离回复慢，积分时间往下降  
曲线波动周期长，积分时间再加长  
曲线振荡频率快，先把微分降下来  
动差大来波动慢。微分时间应加长  
理想曲线两个波，前高后低4比1  
一看二调多分析，调节质量不会低



- 在凑试时，可参考以上参数对系统控制过程的影响趋势，对参数调整实行先比例、后积分，再微分的整定步骤。
- 首先整定比例部分。将比例参数由小变大，并观察相应的系统响应，直至得到反应快、超调小的响应曲线。如果系统没有静差或静差已经小到允许范围内，并且对响应曲线已经满意，则只需要比例调节器即可。
- 如果在比例调节的基础上系统的静差不能满足设计要求，则必须加入积分环节。在整定时先将积分时间设定到一个比较大的值（不是积分系数，积分系数应该减小）。





- 下面以**PID**调节器为例,具体说明经验法的整定步骤:
- (1) 让调节器参数积分系数 **$S_0=0$** ,实际微分系数 **$k=0$** ,控制系统投入闭环运行,由小到大改变比例系数 **$S_1$** ,让扰动信号作阶跃变化,观察控制过程,直到获得满意的控制过程为止。
- (2) 取比例系数 **$S_1$** 为当前的值乘以**0.83**,由小到大增加积分系数 **$S_0$** ,同样让扰动信号作阶跃变化,直至求得满意的控制过程。
- (3) 积分系数 **$S_0$** 保持不变,改变比例系数 **$S_1$** ,观察控制过程有无改善,如有改善则继续调整,直到满意为止。否则,将原比例系数 **$S_1$** 增大一些,再调整积分系数 **$S_0$** ,力求改善控制过程。如此反复试凑,直到找到满意的比例系数 **$S_1$** 和积分系数 **$S_0$** 为止。



- (4) 引入适当的实际微分系数 $k$ 和实际微分时间 $TD$ ,此时可适当增大比例系数 $S1$ 和积分系数 $S0$ 。和前述步骤相同,微分时间的整定也需反复调整,直到控制过程满意为止。注意: 仿真系统所采用的PID调节器与传统的工业PID调节器有所不同,各个参数之间相互隔离,互不影响,因而用其观察调节规律十分方便。
- PID参数是根据控制对象的惯量来确定的。大惯量如: 大烘房的温度控制,一般 $P$ 可在10以上, $I=3-10$ , $D=1$ 左右。小惯量如: 一个小电机带一水泵进行压力闭环控制,一般只用PI控制。 $P=1-10$ , $I=0.1-1$ , $D=0$ ,这些要在现场调试时进行修正的。



# 增量式PID 控制算法

- 如果只需要计算控制量的增量 $\Delta u_k$ ，可以使用增量式PID 控制算法。由式

$$u_k = K_P[e_k + \frac{T}{T_1} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_D}{T}(e_k - e_{k-1})] + u_o$$

可得控制器在第  $k-1$  个采样时刻的输出值为：

$$u_{k-1} = K_P[e_{k-1} + \frac{T}{T_1} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T}(e_{k-1} - e_{k-2})] + u_o$$

•

- 将两式相减，就可以得到增量式PID 控制算法公式为：

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = K_P[e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_1} e_k + \frac{T_D}{T}(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})] =$$



$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = K_P \left[ e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_1} e_k + \frac{T_D}{T} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \right] =$$

$$K_P \left( 1 + \frac{T}{T_1} + \frac{T_D}{T} \right) e_k - K_P \left( 1 + \frac{2T_D}{T} \right) e_{k-1} + K_P \frac{T_D}{T} e_{k-2} = A e_k + B e_{k-1} + C e_{k-2}$$

• 式中

$$A = K_P \left( 1 + \frac{T}{T_1} + \frac{T_D}{T} \right), \quad B = -K_P \left( 1 + \frac{2T_D}{T} \right), \quad C = K_P \frac{T_D}{T}$$

- 由上式可以看出，如果计算机控制系统采用恒定的采样周期 $T$ ，一旦确定了 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，只要用前后3次测量值的偏差，就可以求出控制增量。



- 在许多控制系统中，执行机构需要的是控制变量的绝对值而不是其增量，这时仍可采用增量式计算，但输出则采用位置式的输出形式。得出

$$y(n) = y(n-1) + \Delta y(n) = y(n-1) + K_p \times [\Delta e(n) + I \times e(n) + D \times \Delta^2 e(n)]$$

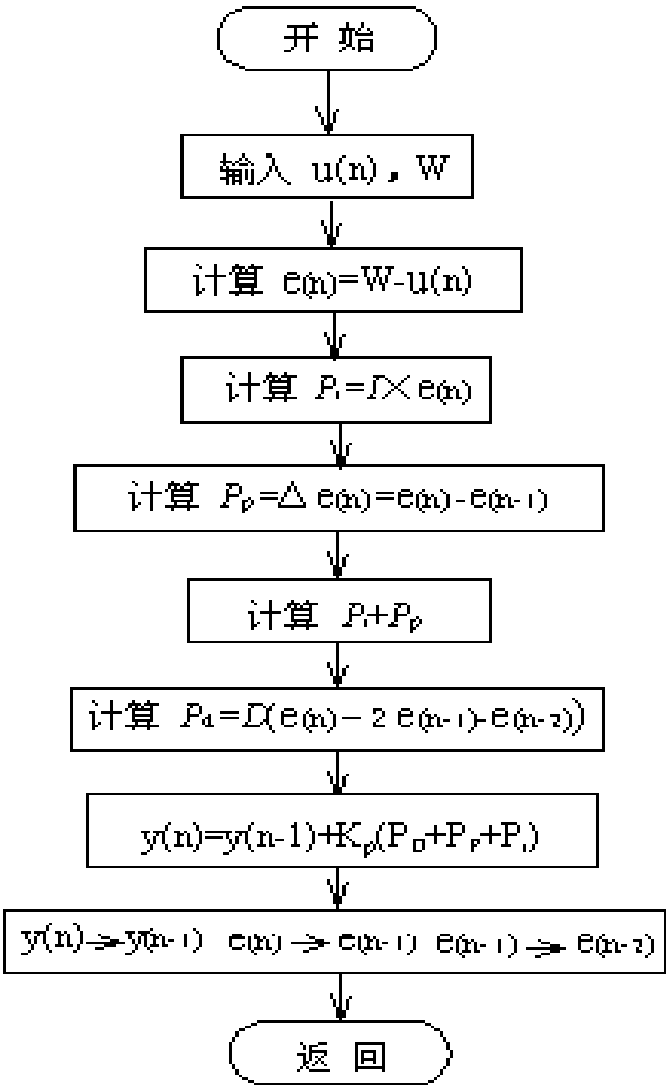
把  $\Delta e(n) = e(n) - e(n-1)$ ,  $\Delta^2 e(n) = \Delta e(n) - \Delta e(n-1) = e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)$  代入上式得：

$$y(n) = y(n-1) + K_p \times [(e(n) - e(n-1)) + I \times e(n) + D \times (e(n) - 2e(n-1) + e(n-2))]$$

$$y(n)=y(n-1)+K_p \times [(e(n)-e(n-1))+I \times e(n)+D \times (e(n)-2 \times e(n-1)+e(n-2))]$$

2A	u(n)中间值	34	K <sub>p</sub> L	3E	e(n-2)L
2B	标志位	35	I <sub>H</sub>	3F	y(n)H
2C	u(n)采样	36	I <sub>L</sub>	40	y(n)L
2D	u(n)采样	37	D <sub>H</sub>	41	
2E	u(n)采样	38	D <sub>L</sub>	42	ymax
2F	y(n+1)H	39	e(n)H	43	ymin
30	y(n+1)L	3A	e(n)L	44	
31	WH	3B	e(n-1)H	45	
32	WL	3C	e(n-1)L	46	
33	K <sub>p</sub> H	3D	e(n-2)H	47	

图D-1 参数内部RAM分配图



图D-2 PID位置式算法流程图

现以上面公式进行编程。参数内存分配如图所示，流程图如图所示。



- 谢谢！