吉林大学

JILIN UNIVERSITY OF CHINA

计算机控制系统

计算机控制系统

第十一讲

数字PID的改进与参数整定

教师：唐志国
单位：通信工程学院

数字PID的改进与参数整定

本讲主要内容：

- （一）PID控制规律离散化
- （二）数字PID算法存在的问题
- （三）数字PID控制器的改进
- （四）数字PID参数的整定

PID控制规律离散化

连续控制系统中的模拟PID控制规律为

$$u(t)=K_{\mathrm{P}}[e(t)+\frac{1}{T_{\mathrm{I}}}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+T_{\mathrm{D}}\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}]$$

计算机控制系统中，利用外接矩形法进行数值积分，一阶后向差分进行数值微分，

$$t\approx iT(i=0,1,2,\cdots)$$

$$e(t)\approx e(iT)$$

$$\int_0^t e(t)\mathrm{d}t\approx\sum_{j=0}^{i}e(\mathrm{j}T)T=T\sum_{j=0}^{i}e(\mathrm{j}T)$$

$$\frac{\mathrm{de(t)}}{\mathrm{d}t}\approx\frac{e(iT)-e[(i-1)T]}{T}$$

当选定采样周期为T时，有

$$u_i=K_{\mathrm{P}}[e_i+\frac{T}{T_{\mathrm{I}}}\sum_{j=0}^{i}e_j+\frac{T_{\mathrm{D}}}{T}(e_i-e_{i-1})]$$

$$u_i = K_P[e_i + \frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{i} e_j + \frac{T_D}{T}(e_i - e_{i-1})]$$

u_i为全量输出，它对应于被控对象的执行机构第i次采样时刻应达到的位置，因此，该式称为PID**位置型**控制算式，其输出值与过去所有状态有关。当执行机构需要的不是控制量的绝对数值，而是其增量时，由上式可导出**增量型**PID控制算式

$$\Delta u_i = u_i - u_{i-1}$$

$$\Delta u_i = K_P[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_I}e_i + \frac{T_D}{T}(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})]$$

还可写成**递推型**PID控制算式

$$u_i = u_{i-1} + K_P[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_I}e_i + \frac{T_D}{T}(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})]$$

$$u_i = K_P[e_i + \frac{T}{T_I}\sum_{j=0}^{i} e_j + \frac{T_D}{T}(e_i - e_{i-1})]$$

$$\Delta u_i = K_P[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_I} e_i + \frac{T_D}{T}(e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2})]$$

增量型控制算式具有以下优点：

- ✓ 计算机只输出控制增量，即执行机构位置的变化部分，因而误动作影响小；
- ✓ 在 i 时刻的输出 u_i，只需用到此时刻的偏差，以及前一时刻，前两时刻的偏差 e_{i-1}，e_{i-2} 和前一次的输出值 u_{i-1}，这大大节约了内存和计算时间；
- ✓ 在进行手动－自动切换时，控制量冲击小，能够较平滑地过渡 。

将模拟控制器的传递函数

$$G_c(s)=K_P(1+\frac{1}{T_I s}+T_D s)$$

用后向差分方法等效离散化$(s=(1-z^{-1})/T)$，可得PID控制规律的脉冲传递函数形式

$$D(z)=G_c(s)\Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{T}}=K_P[1+\frac{T}{T_I}\frac{1}{1-z^{-1}}+\frac{T_D}{T}(1-z^{-1})]=\frac{U(z)}{E(z)}$$

所以

$$U(z)=K_P[E(z)+\frac{T}{T_I}\frac{1}{1-z^{-1}}E(z)+\frac{T_D}{T}(1-z^{-1})E(z)]$$

数字PID算法存在的问题

- ✓任何一种执行机构都存在一个线性工作区，同时，执行机构的动态特性也存在一个线性工作区。
- ✓增量式PID算法中微分项和比例控制作用过大将出现微分饱和，都会使执行机构进入非线性区，从而使系统出现过大的超调或持续振荡，动态品质变坏。
- ✓为了克服以上两种饱和现象，避免系统的过大超调，使系统具有较好的动态品质，必须使PID控制器输出的控制信号受到约束，即对标准的PID控制算法进行改进，并主要是对积分项和微分项进行改进。

数字PID控制器的改进

位置型积分饱和的抑制

物理执行元件的机械和物理性能是受约束的，即输入$u(t)$的取值是在有限范围内，同时其变化率也受限制。控制系统在启动、停止或者大幅度提降给定值等情况下，系统输出会出现较大的偏差，这种较大偏差，不可能在短时间内消除，经过积分项累积后，可能会使控制量$u(k)$很大，甚至超过执行机构的极限。另外，当负误差的绝对值较大时，也会出现另一种极端情况。

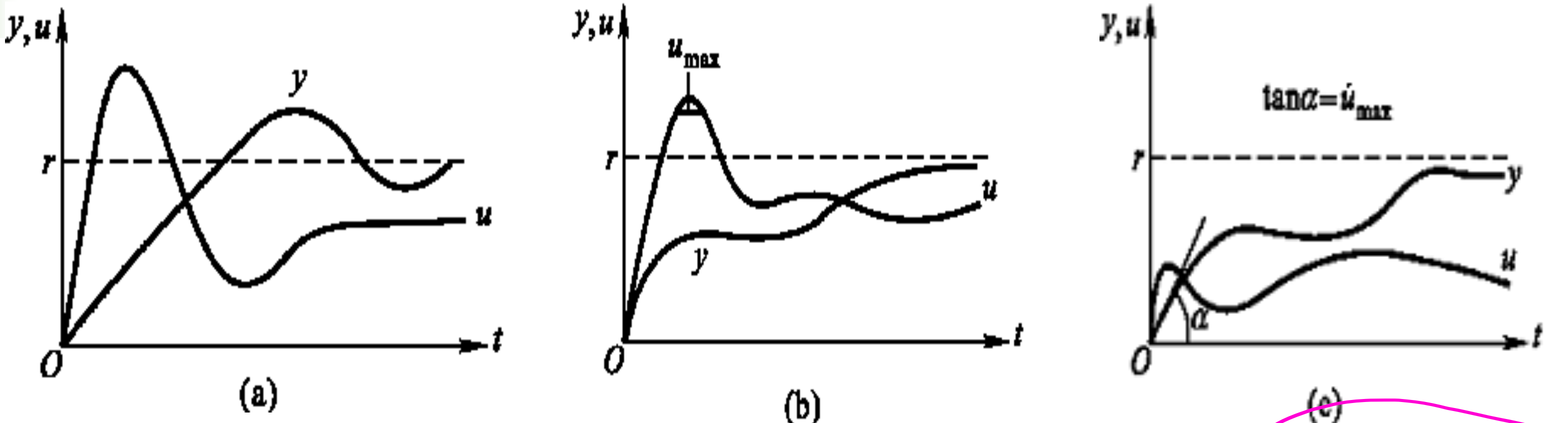
减小积分饱和的关键在于不能使积分项累积过大。因此当偏差大于某个规定的门限值时，删除积分作用，PID控制器相当于一个PD调节器，既可以加快系统的响应又可以消除积分饱和现象，不致使系统产生过大的超调和振荡。

只有当误差e在门限之内时，加入积分控制，相当于PID控制器，则可消除静差，提高控制精度。积分分离法的控制规律为

$$u_i = K_p[e_i + \underbrace{\frac{K_1 T}{T_I}\sum_{j=0}^{i} e_j}_{\text{饱和后去掉这部分}} + \frac{T_D}{T}(e_i - e_{i-1})] \qquad K_1 = \begin{cases} 1, 当\left|e_i\right| \le \varepsilon \\ 0, 当\left|e_i\right| > \varepsilon \end{cases}$$

增量型比例微分饱和的抑制

在增量算法中，有可能出现比例及微分饱和现象。当给定值发生很大跃变时，在PID增量控制算法中的比例部分和微分部分计算出的控制增量可能比较大。如果该计算值超过了执行元件所允许的最大限度，那么，控制作用必然不如应有的计算值理想，其中计算值的多余信息没有执行就遗失了，从而影响控制效果。



抑制比例和微分饱和的办法之一是用“积分补偿法”。其中心思想是将那些因饱和而未能执行的增量信息积累起来，一旦有可能再补充执行。这样，动态过程也得到了加速。即，一旦Δu超限，则多余的未执行的控制增量将存储在累加器中；当控制量脱离了饱和区，则累加器中的量将全部或部分地加到计算出的控制增量上，以补充由于限制而未能执行的控制。

干扰的抑制

对于干扰，除了采用抗干扰措施，进行硬件和软件滤波之外，还可以通过对PID控制算法进行改进，以进一步克服干扰的影响。

在数字PID控制中，干扰主要是通过微分项引起。但微分成分在PID算法中很重要，因此不能简单地将微分项部分去掉。

二阶差分

通常是用四点中心差分法，对微分项进行改进，降低其对干扰的敏感程度。

在四点中心差分法中，一方面将T_D/T取得略小于理想情况；另一方面，在组成差分时，不是直接引用现时偏差e_i，而是用过去四个时刻的偏差平均值作基准，即

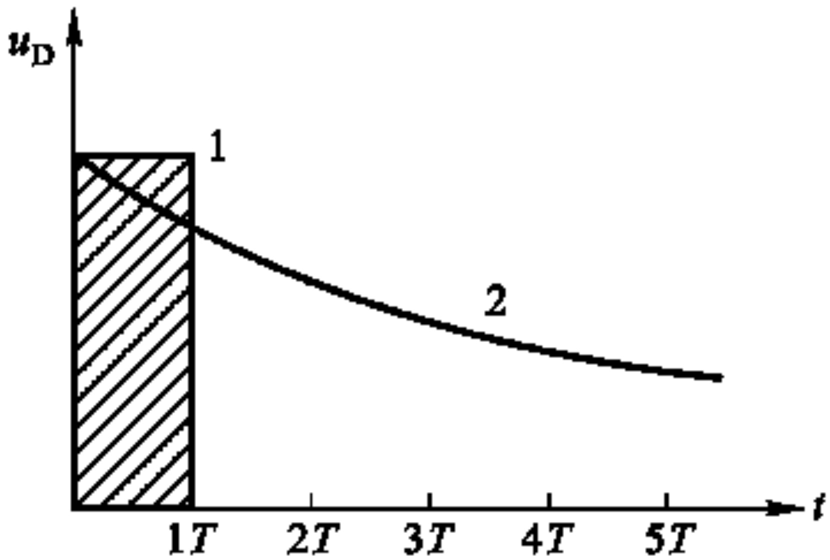
$$\bar{e}_i = \frac{e_i + e_{i-1} + e_{i-2} + e_{i-3}}{4}$$

通过加权平均近似微分项

$$\frac{T_D \Delta \bar{e}_i}{T} = \frac{T_D}{4}\left(\frac{e_i - \bar{e}_i}{1.5T} + \frac{e_{i-1} - \bar{e}_i}{0.5T} - \frac{e_{i-2} - \bar{e}_i}{0.5T} - \frac{e_{i-3} - \bar{e}_i}{1.5T}\right)$$

微分项改进

在标准数字PID算法中，微分控制作用只体现在误差信号发生瞬变的第一个采样周期内，从第二个采样周期开始，微分部分输出变为零。而在连续控制系统中，PID控制器的微分部分能在较长时间内起作用。



PID控制器的改进算法：

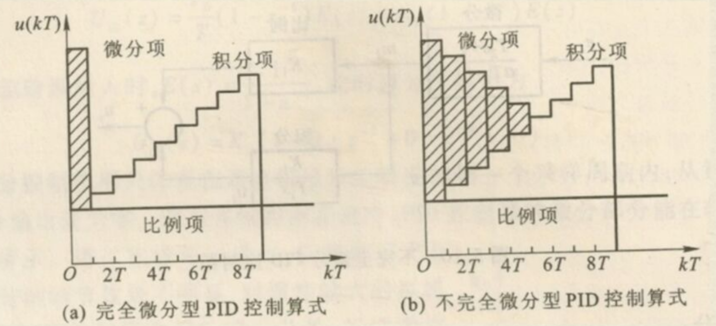


图5.17 两种微分作用的比较

工程上一般采用加入惯性环节的不完全微分数字控制器，它不仅可以平滑微分产生的瞬时脉动，而且能加强微分对全过程的影响。

✓ 不完全微分PID调节规律

$$G'(s)=\frac{K_\mathrm{P}}{T_\mathrm{f}s+1}(1+\frac{1}{T_\mathrm{I}s}+T_\mathrm{D}s)=\frac{K_\mathrm{p}(1+T_\mathrm{I}s+T_\mathrm{I}sT_\mathrm{D}s)}{T_\mathrm{I}s(T_\mathrm{f}s+1)}$$

加惯性

除了上述方法外，还可以采用遇限削弱积分法、微分先行法，并结合量化效应和手动切换等影响改进PID控制算法。总之，所有的改进方法都是以积分项和微分项为核心的。

数字PID参数的整定

在实际控制系统中，控制算式一旦确定，比例，积分和微分参数的整定就成为重要的工作。控制效果的好坏在很大程度上取决于这些参数选择得是否得当。关于PID控制参数整定方法有很多。通常首先要对工业对象的动态特性作某种简单假设。因此，由这些整定方法得到的参数值在使用时不一定是最佳的，往往只作为参考值。在实时控制中，还要在这些值附近探索，找出实用中有效的最佳值。

- ✓ PID参数整定的理论法
- ✓ 试凑法确定PID调节参数
- ✓ 简易工程法整定参数

理论法

参数整定的目的就是通过调整PID的三个参数K_P、T_I、T_D将系统的闭环特征根分布在s域的左半平面的某一特定域内，以保证系统具有足够的稳定裕度并满足给定的性能指标。

只有被控对象的数学模型足够精确时，才能把特征根精确地配置在期望的位置上。

大多数实际系统的参数又随环境变化而变化，理论设计的极点配置往往与实际系统不能精确匹配，但是可以通过系统辨识来解决这一问题。

PID控制参数不唯一

★ 试凑法

Kp从小到大，反应快超调小静差足够小

T_I大Kp缩80%，逐渐减小T_I，消除静差后动态性能较好

T_D从0增加，同时调整T_I和K_p，直到满意

某个参数减小可由其他参数增减来补偿

✓增大比例系数K_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。但过大的比例系数会使系统有较大的超调，并产生振荡，使系统的稳定性变坏；

✓增大积分时间T_I一般有利于减小超调，减小振荡，使系统更加稳定，但系统静差的消除将随之减慢；

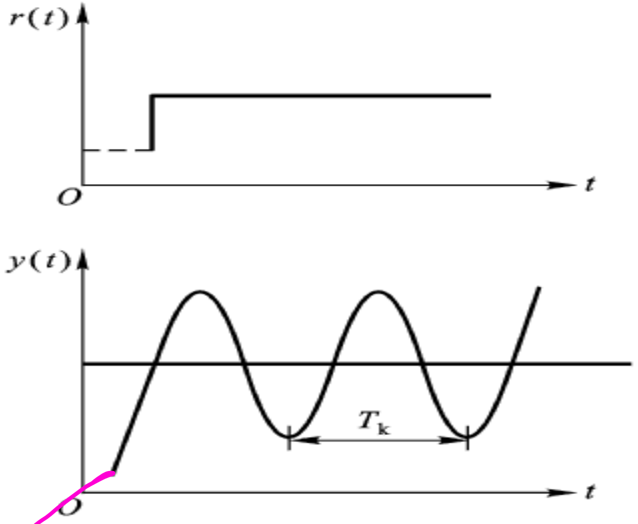
✓增大微分时间T_D亦有利于加快系统的响应，减小振荡，使系统稳定性增加，但系统对干扰的抑制能力减弱，对扰动有较敏感的响应；另外，过大的微分系数也将使系统的稳定性变坏。

简易工程法

工程上仍广泛使用实验方法和经验方法来整定PID的调节参数，称为PID参数的工程整定方法。

这种方法的最大优点在于整定参数不必依赖被控对象的数学模型，简单易行，适于现场的实时控制应用，但是整定过于粗糙。

扩充临界比例度法



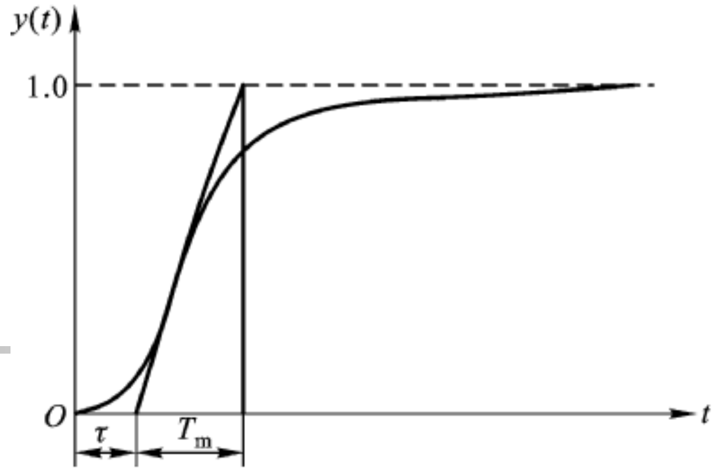
✓选择足够小的采样周期T。若含纯滞后，可取纯滞后时间的1/10以下；

✓使系统按纯比例控制，并从小到大改变K_P，直到系统的阶跃响应持续4-5次等幅振荡，求此时临界比例度$\delta_k=1/K_P$和振荡周期T_k；临界周期　临界振荡

✓采用扩充临界比例法选定控制度 $\text{控制度}=\dfrac{[\int_0^{\infty} e^2 dt]_{数字PID}}{[\int_0^{\infty} e^2 dt]_{模拟PID}}=1.05$

✓根据选定控制度，从表中查出对应的T及PID参数；

✓整定PID并进行运行试验，直到系统处于最佳状态。



扩充响应曲线法

✓手动操作使系统稳定，然后突然改变给定值，给对象一个阶跃输入信号；

✓用实验方法测定系统对阶跃函数的响应曲线；

✓在响应曲线最大斜率处作切线，求出等效的纯滞后时间T和等效的时间常数T_m及其比值T_m/T，并选取控制度；

✓根据选定控制度，从表中查出对应的T及PID参数；

✓整定PID并进行运行试验，直到系统处于最佳状态。