

4 PID调节原理



4 PID调节原理

本章学习内容

- ❖ 4.1 PID控制概述
- ❖ 4.2 比例调节
- ❖ 4.3 积分调节
- ❖ 4.4 微分调节
- ❖ 4.5 比例积分微分调节（PID调节）
- ❖ 4.6 数字PID控制
- ❖ 4.7 PID调节器参数的工程整定
- ❖ 4.8 智能PID控制方法



4 PID调节原理

4.1 PID控制概述

- ❖ PID 控制是比例积分微分控制
 - (**Proportional-Integral-Differential**)
- ❖ 历史最久、生命力最强的控制方式



4 PID调节原理

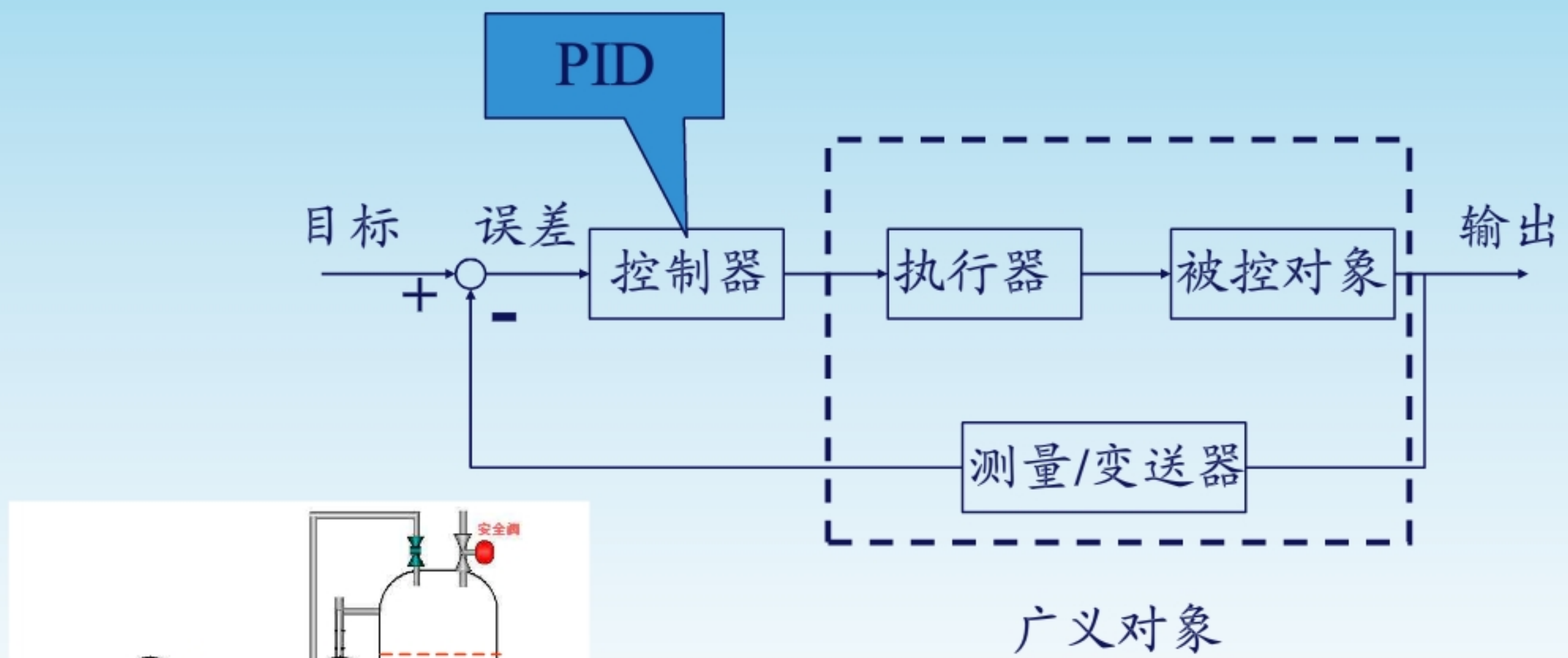
❖ 反馈控制

——根据误差进行的控制



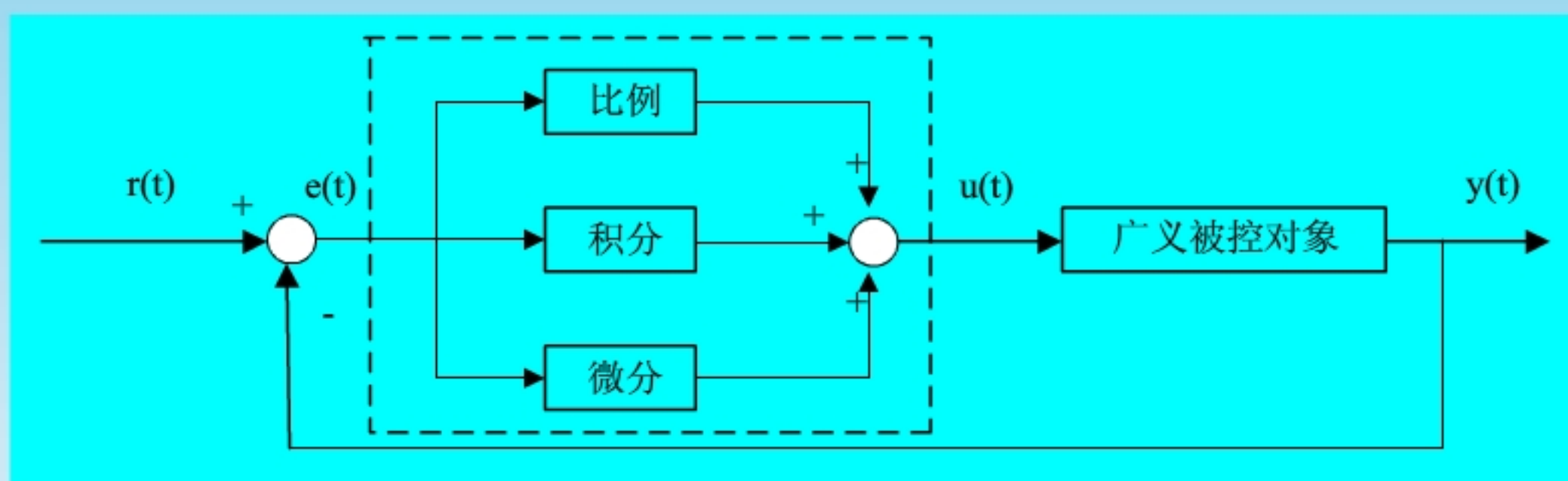
4 PID调节原理

❖ 反馈控制



4 PID调节原理

❖ 常规PID控制系统的原理



- 输入：控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$
- 输出：偏差的比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 的线性组合

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.2)$$

式中 K_p —— 比例系数
 T_I —— 积分时间常数
 T_D —— 微分时间常数



4 PID调节原理

PID控制的优点

- ①原理简单，使用方便；
- ②适应性强；
- ③鲁棒性强；

控制品质对被控对象特性的变化不大敏感。

- ④对模型依赖少。



4 PID调节原理

4.2 比例调节（P调节）

4.2.1 比例调节的动作规律，比例带

❖ 在P调节中，调节器的输出信号 u 与偏差信号 e 成比例，即，

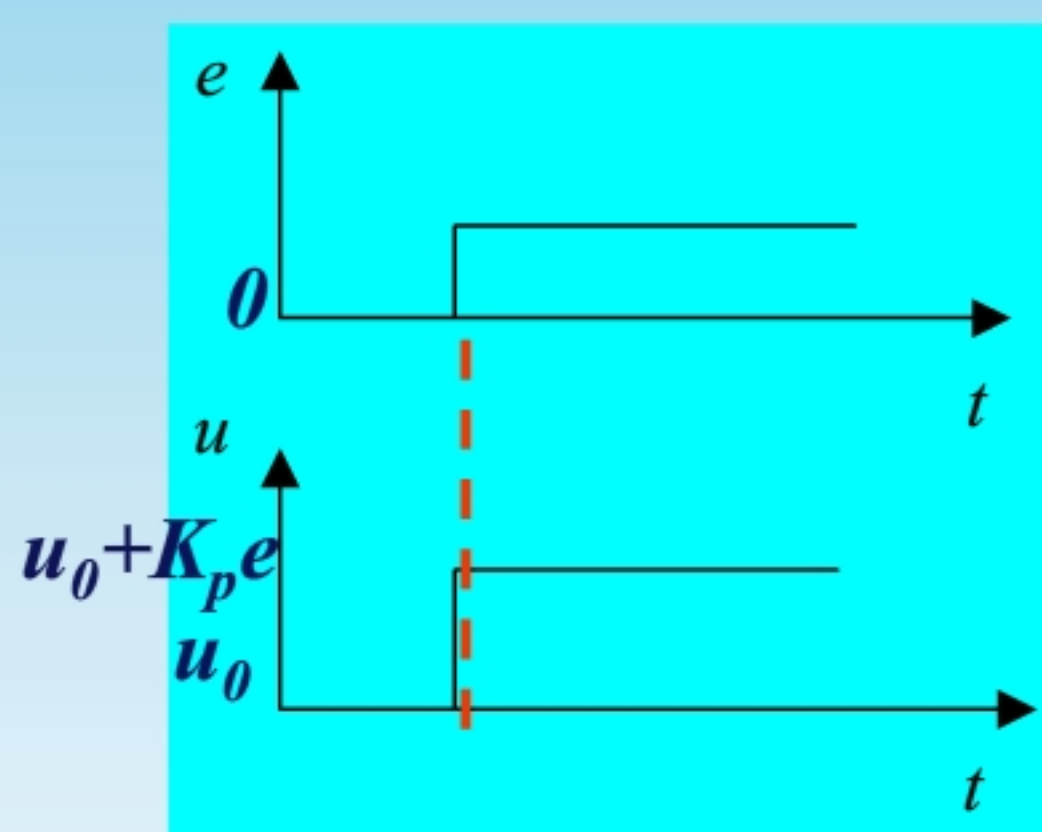
$$u = K_p e \quad (4.3)$$

式中 K_p 称为比例增益



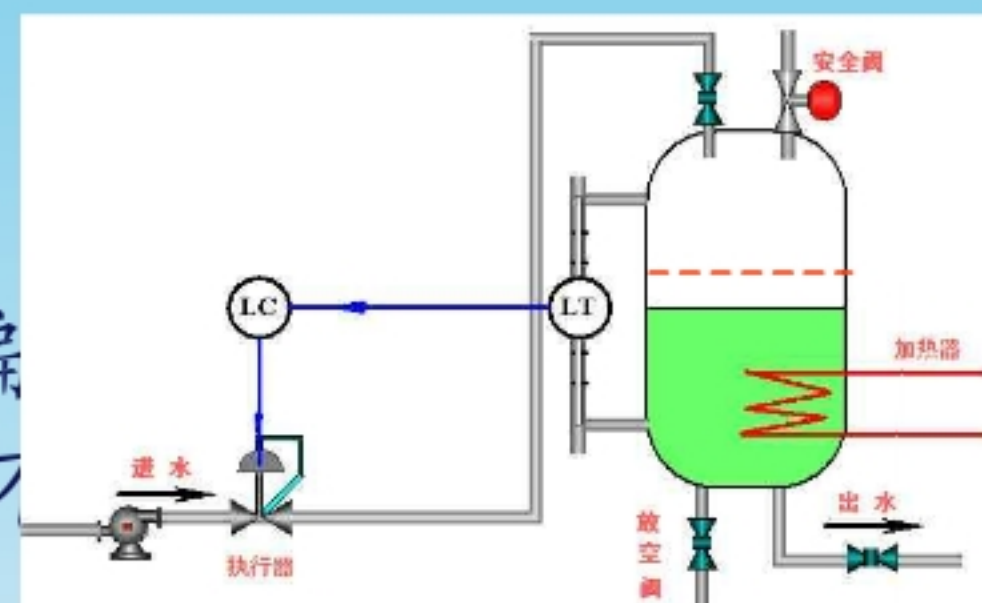
4 PID调节原理

❖ P调节的阶跃响应



$$u = K_p e$$

- P调节对偏差反应，没有



- 输出u实际上是对其起始值的增量。因此，当偏差e为零，因而 $u = 0$ 时，并不意味着调节器没有输出，它只说明此时有 $u = u_0$ 。
- u_0 的大小是可以通过调整调节器的工作点加以改变的。



4 PID调节原理

❖ 比例带

为表示调节器输入和输出之间的比例关系，在过程控制中习惯用比例带（比例度） δ 来代替比例增益：

$$\delta = \frac{e/(e_{\max} - e_{\min})}{u/(u_{\max} - u_{\min})} \times 100\% = \frac{1}{K_P} \frac{u_{\max} - u_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100\% \quad (4.5)$$

式中 $e_{\max} - e_{\min}$ -----偏差信号范围，即仪表量程

$u_{\max} - u_{\min}$ -----调节器输出信号范围，即控制器输出的工作范围



4 PID调节原理

δ 具有重要的物理意义

- ❖ u 代表调节阀开度的变化量， δ 就代表使调节阀开度改变100% 即从全关到全开时所需要的被调量的变化范围。
 - 例如，若测量仪表的量程为100℃则 $\delta = 50\%$ 就表示被调量需要改变50℃才能使调节阀从全关到全开。
- ❖ 当被调量处在“比例带”
 - 以内调节阀的开度(变化)才与偏差成比例。
- ❖ 超出这个“比例带”以外
 - 调节阀已处于全关或全开的状态，调节器的输入与输出已不再保持比例关系。



4 PID调节原理

❖ 如果采用单元组合仪表，调节器的输入和输出都是统一的标准信号，即 $e_{\max} - e_{\min} = u_{\max} - u_{\min}$ ，则有

$$\delta = \frac{e}{u} \times 100\% = \frac{1}{K_p} \times 100\% \quad (4.6)$$

❖ 此时比例带（比例度） δ 与比例增益成反比，比例带小，则较小的偏差就能激励调节器产生100%的开度变化，相应的比例增益就大。



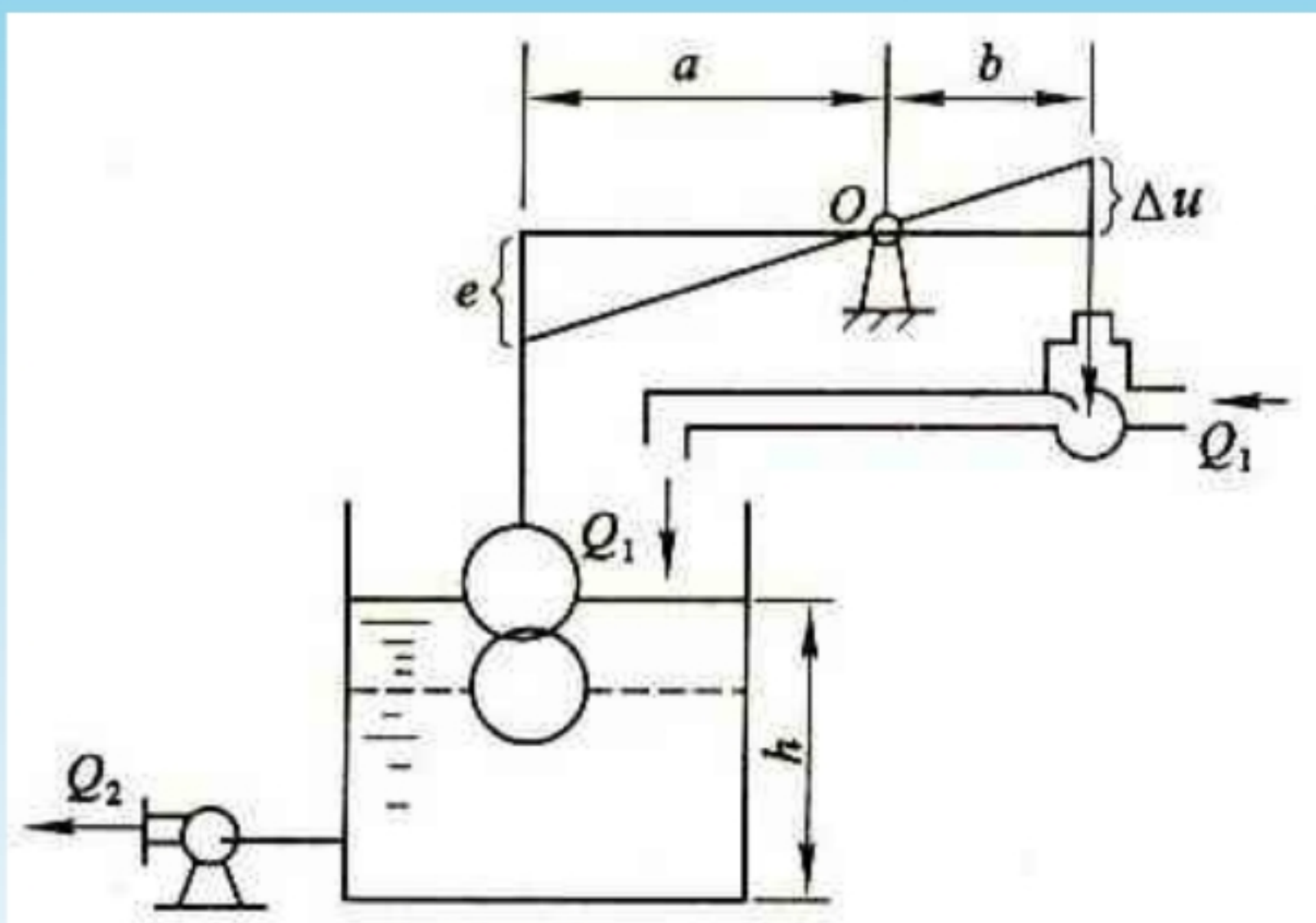
4 PID调节原理

4.2.2 比例调节的特点，有差调节

比例调节的显著特点就是有差调节。



4 PID调节原理



• 这里的杠杆充当了比例调节器：

- 液位变化 e 是其输入；
- 阀杆位移 Δu 是其输出；
- 调节器的比例增益为：

$$K_P = \frac{\Delta u}{e} = \frac{b}{a}$$

- 该比例调节器是有余差的！
- 余差的大小与比例增益有关



4 PID调节原理

❖ 余差（或静差）是指：

- 被调参数的新的稳定值与给定值不相等而形成的差值。

❖ 余差的大小与调节器的放大系数 K 或比例带 δ 有关

- 放大系数越小，即比例带越大，余差就越大；
- 放大系数越大，即比例带越小，比例调节作用越强，余差就越小。



4 PID调节原理

4.2.3 比例带对于调节过程的影响

a) δ 大

- 调节阀的动作幅度小，变化平稳，甚至无超调，但余差大，调节时间也很长

b) δ 减小

- 调节阀动作幅度加大，被调量来回波动，余差减小

c) δ 进一步减小

- 被调量振荡加剧

d) δ 为临界值

- 系统处于临界稳定状态

e) δ 小于临界值

- 系统不稳定，振荡发散

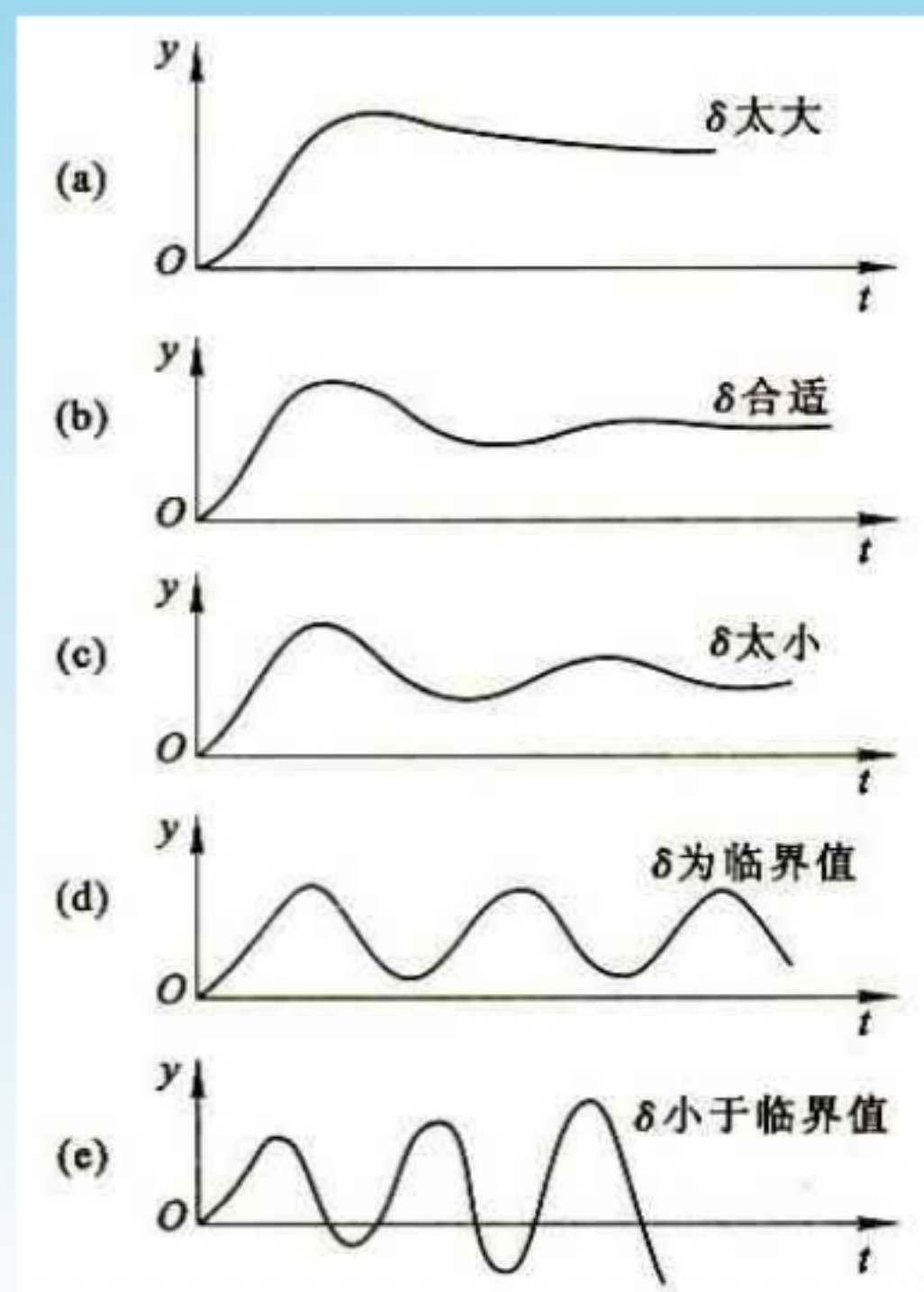


图4.4 δ 对比例调节过程的影响



4 PID调节原理

比例调节的特点：

- (1) 比例调节的输出增量与输入增量呈一一对应的比例关系，即： $u = K e$
- (2) 比例调节反应速度快，输出与输入同步，没有时间滞后，其动态特性好。
- (3) 比例调节的结果不能使被调参数完全回到给定值，而产生余差。



4 PID调节原理

比例带的一般选择原则:

- ❖ 若对象较稳定（对象的静态放大系数较小，时间常数不太大，滞后较小）
 - 则比例带可选小些，这样可以提高系统的灵敏度，使反应速度加快一些；
- ❖ 相反，若对象的放大系数较大，时间常数较小，滞后时间较大
 - 则比例带可选大一些，以提高系统的稳定性。



4 PID调节原理

❖ 比例带的选取，一般情况下，比例带的范围大致如下：

- 压力调节： 30~70%
- 流量调节： 40~100%
- 液位调节： 20~80%
- 温度调节： 20~60%



4 PID调节原理

4.3 积分调节 (I调节)

4.3.1 积分调节动作规律

❖ 调节器的输出信号的变化速度 du/dt 与偏差信号 e 成正比，或者说调节器的输出与偏差信号的积分成正比，即：

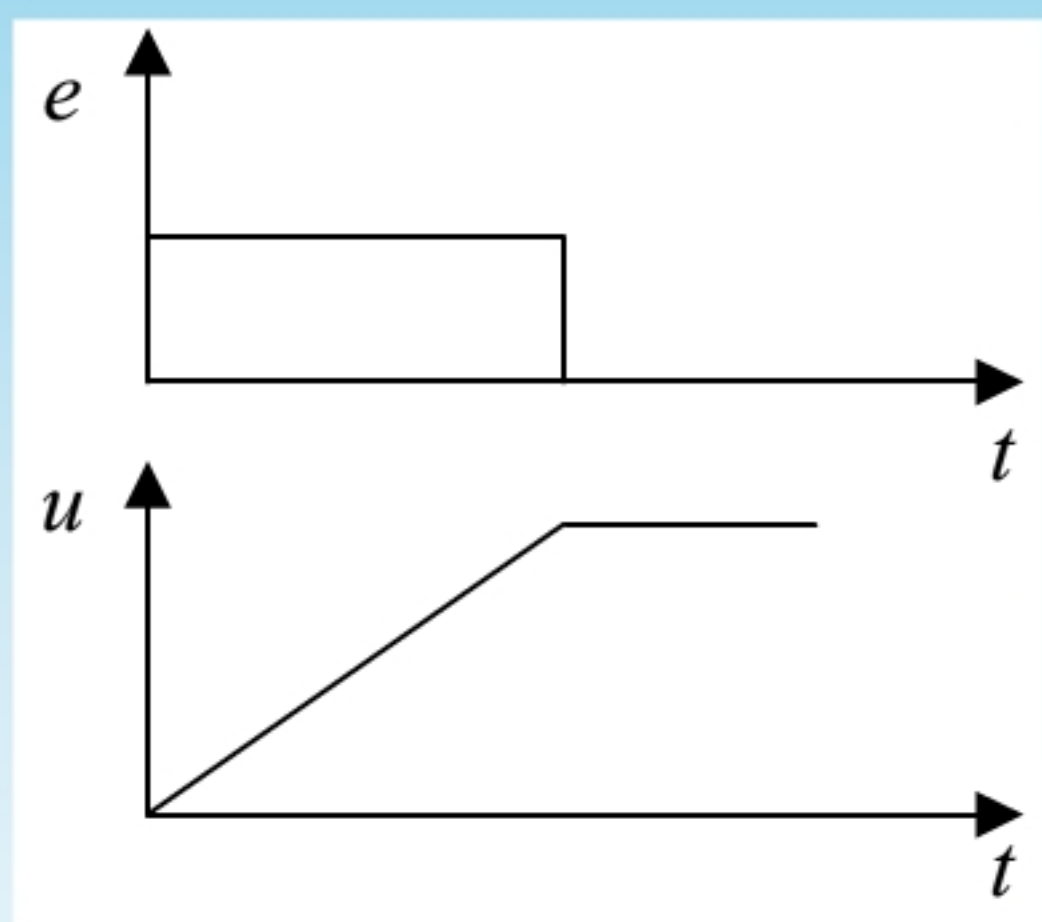
$$\frac{du}{dt} = S_0 e \quad (4.9)$$

$$u = S_0 \int_0^t e dt \quad (4.10)$$



4 PID调节原理

❖ 积分调节的阶跃响应



$$u = S_0 \int_0^t e dt$$

- I调节器的输出不仅与偏差信号的大小有关，还与偏差存在的时间长短有关。
- 只要偏差存在，调节器的输出就会不断变化，直到偏差为零调节器的输出才稳定下来不再变化。
- 所以积分调节作用能自动消除余差。
- 注意I调节的输出不像P调节那样随偏差为零而变到零。

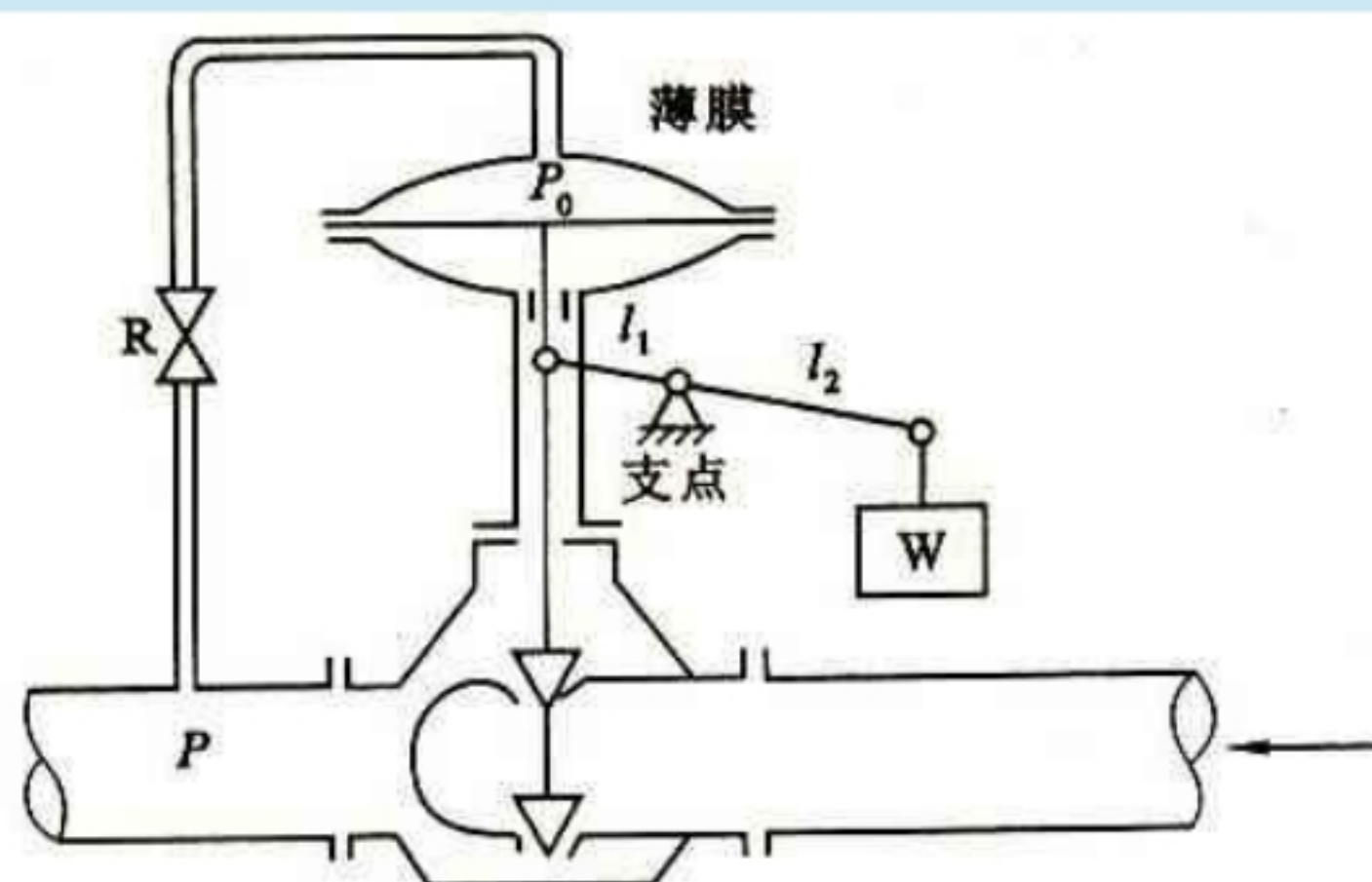


4 PID调节原理

❖ 图示的自力式气压调节阀就是一个简单的积分调节器：

- 管道压力P是被调量，它通过针形阀R与调节阀膜头的上部空腔相通，而膜头的下部空腔则与大气相通。
- 改变针形阀的开度可改变积分速度 S_0

$$\frac{du}{dt} = S_0 e$$

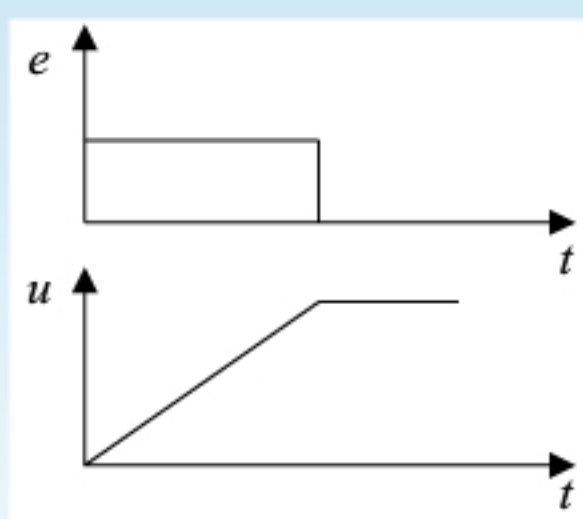


4 PID调节原理

4.3.2 积分调节的特点，无差调节

❖ 积分调节的特点是**无差调节**

$$u = S_0 \int_0^t e dt$$



- 只要偏差不为零，控制输出就不为零，它就要动作到把被调量的静差完全消除为止
- 而一旦被调量偏差 e 为零，积分调节器的输出就会保持不变。
- 调节器的输出可以停在任何数值上，即：
 - 被控对象在负荷扰动下的调节过程结束后，被调量没有余差，而调节阀则可以停在新的负荷所要求的开度上。



4 PID调节原理

❖ 积分调节的稳定性

- 它的稳定作用比P调节差，采用积分调节不可能得到稳定的系统。

$$G_K = \frac{K}{(s+1)(2s-1)}$$

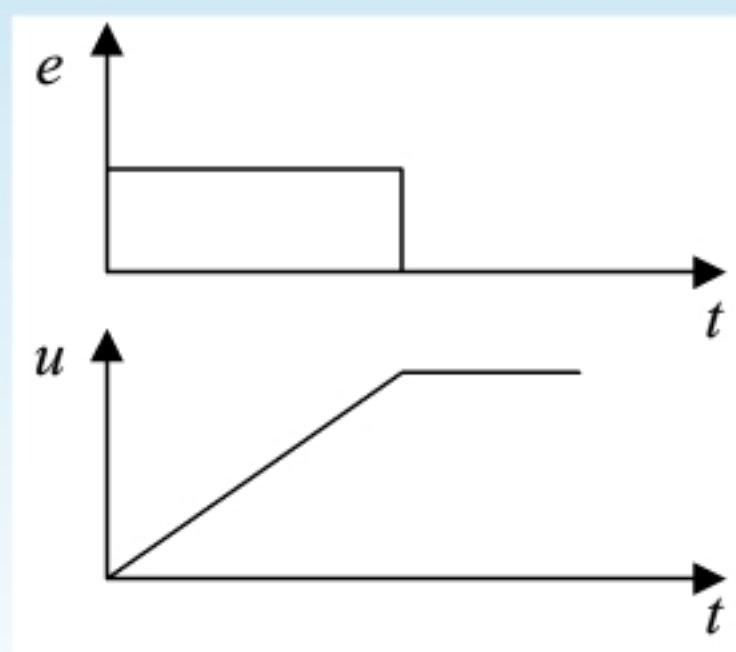
K=2
K=0.2



4 PID调节原理

❖ 积分调节的滞后性

- 它的滞后特性使其难以对干扰进行及时控制，所以一般在工业中，很少单独使用I调节，而基本采用PI调节代替纯I调节。



4 PID调节原理

4.3.3 积分速度对于调节过程的影响

- ❖ 采用积分调节时，控制系统的开环增益与积分速度 S_0 成正比。
- ❖ 增大积分速度降低系统的稳定程度。



4 PID调节原理

❖ 积分速度（积分常数）的大小对调节过程影响：

■ 增大积分速度

- 调节阀的速度加快，但系统的稳定性降低
- 当积分速度大到超过某一临界值时，整个系统变为不稳定，出现发散的振荡过程。
- S_0 愈大，则调节阀的动作愈快，就愈容易引起和加剧振荡，而最大动态偏差则愈来愈小。

■ 减小积分速度

- 调节阀的速度减慢，结果是系统的稳定性增加了，但调节速度变慢
- 当积分常数小到某一临界值时，调节过程变为非振荡过程。

■ 无论增大还是减小积分速度，被调量最后都没有残差

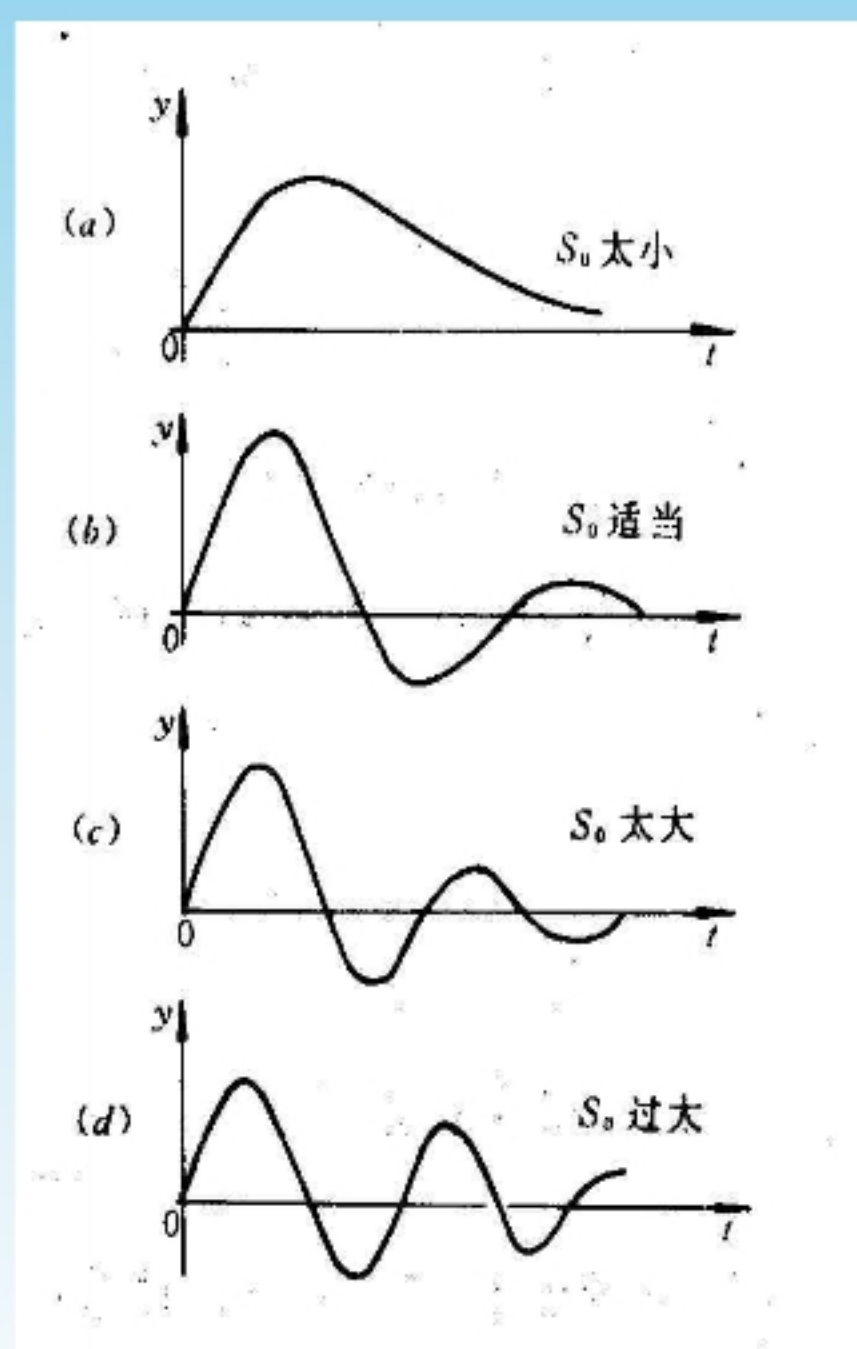


图4.7 积分速度 S_0 对调节过程的影响



4 PID调节原理

比例调节和积分调节的比较:

❖ 比例调节是有差调节，积分调节是无差调节

❖ 比例调节能立即响应偏差变化

积分调节调节过程缓慢

∴当被调参数突然出现较大的偏差时

- 比例调节能立即按比例把调节阀的开度开得很大

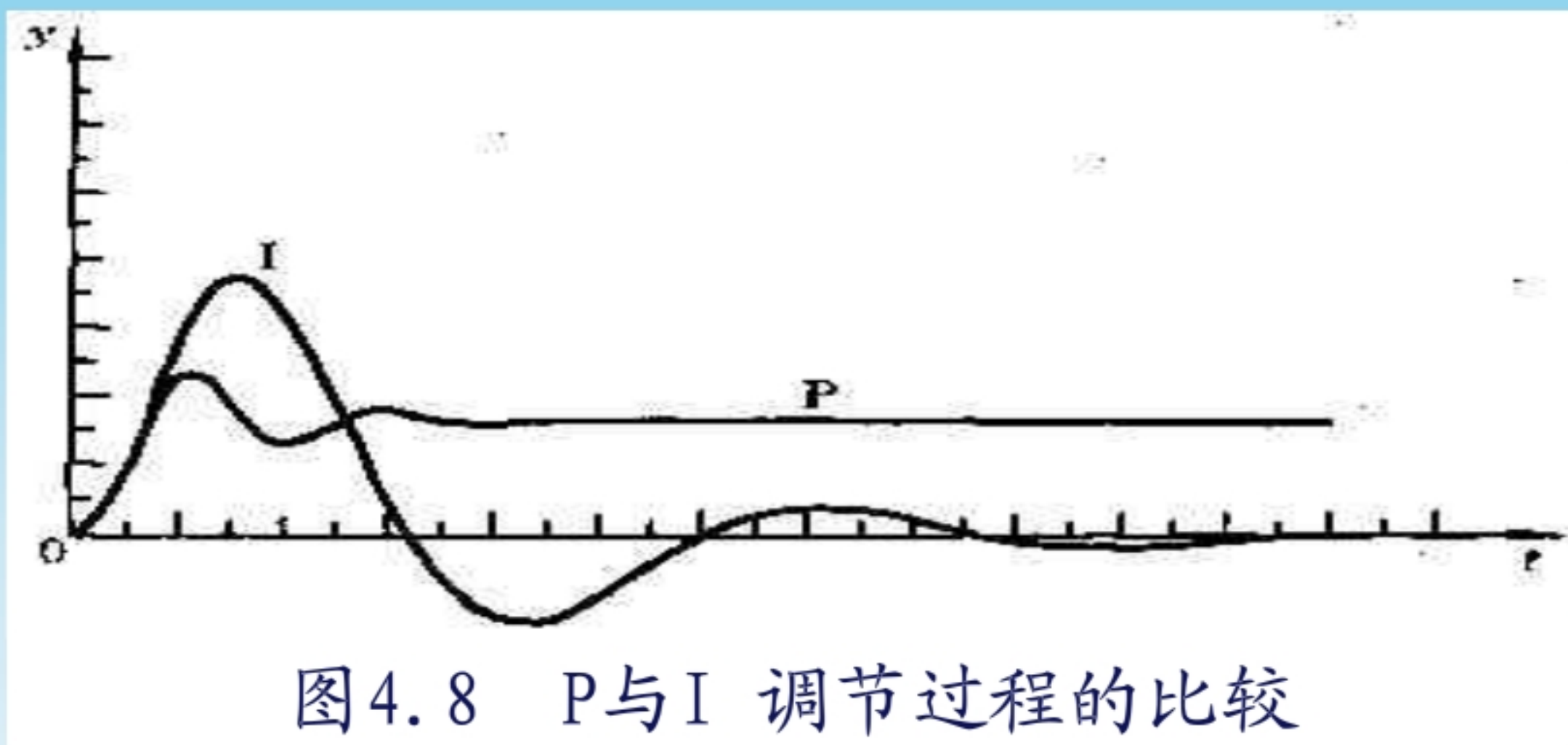
- 但积分调节器需要一定的时间才能将调节阀的开度开大或减小

∴如果系统干扰作用频繁，积分调节会显得十分乏力

❖ 单独的积分调节系统较罕见，它作为一种辅助调节规律与比例调节一起组成比例积分调节规律。



4 PID调节原理



结论:

- P调节有余差
- I调节没有余差，但超调大，不如P稳定



4 PID调节原理

4.4 微分调节（D调节）

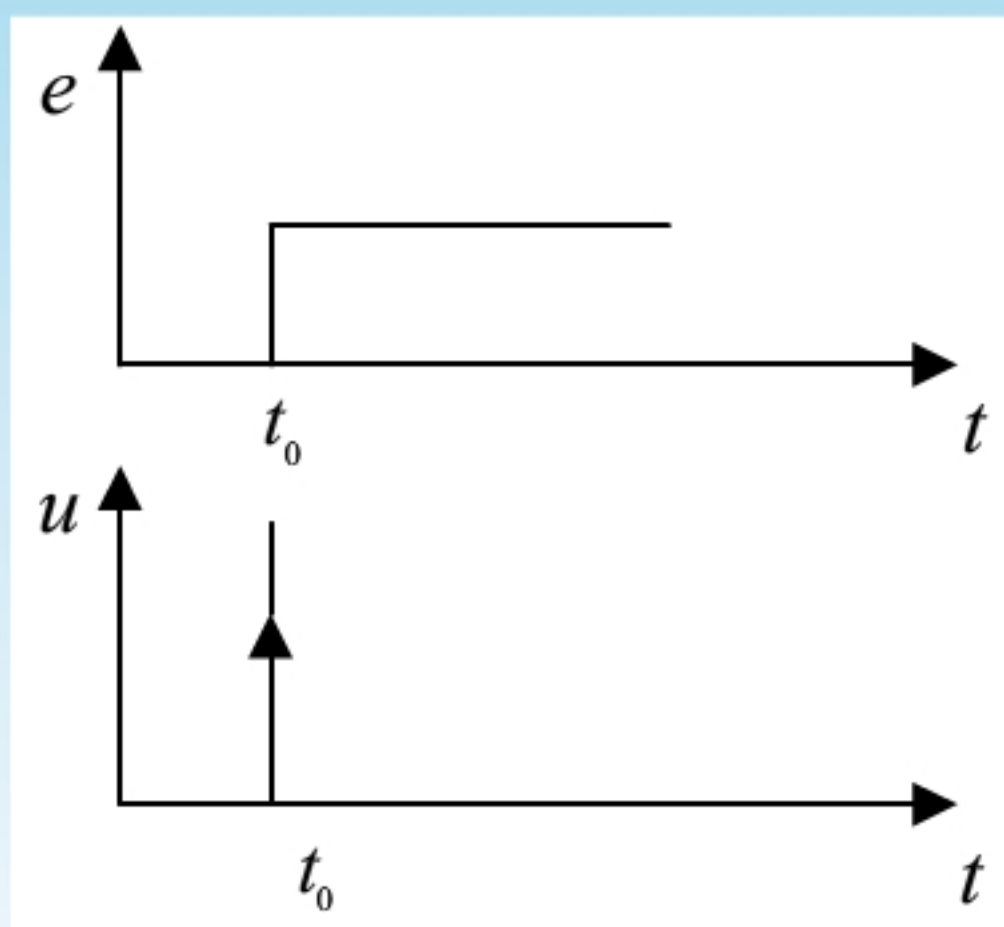
❖ 调节器的输出 u 与被调量或其偏差 e 对于时间的导数成正比，即

$$u = S_2 \frac{de}{dt} \quad (4.12)$$

式中， S_2 —— 微分时间。

4 PID调节原理

❖ D调节的阶跃响应



微分调节的思想:

微分调节只与偏差的变化成比例，偏差变化越剧烈，由微分调节器给出的控制作用越大，从而及时地抑制偏差的增长，提高系统的稳定性。



4 PID调节原理

❖ 调节器在 $t=t_0$ 时刻，输入阶跃偏差 e ，偏差的变化速度为：

$$\frac{de}{dt} = \infty$$

- 之后，调节器的输出立即又回到零，理想的微分调节特性曲线为一垂直直线。



4 PID调节原理

- ❖ 如加热炉温度自动调节,当温度低于给定值时,则煤气阀门应开大,这是比例调节作用,但同时发现,温度降低的速度很快,说明出现了较大的扰动,则下一时刻的偏差将会更大,因此应预先采取措施,即**提前动作**,把煤气阀门的开度开得更大一些,这叫**超前作用**。



4 PID调节原理

微分调节的特点

- ❖ P和I是根据已经形成的被调参数与给定值之偏差而动作(即偏差的方向和大小进行调节)。
- ❖ 微分调节是根据偏差信号的微分,即偏差变化的速度而动作的。
 - 只要偏差一露头,调节器就立即动作,以求更好的调节效果
 - 偏差没有变化,微分调节不起作用。
- ❖ 微分调节主要用于克服调节对象有较大的传递滞后和容量滞后。



4 PID调节原理

❖ 注意:

1. 微分调节不能消除余差。

∵微分调节只对偏差的变化做出反应，而与偏差的大小无关。

2. 单纯的微分调节器也是不能工作的。

∵实际的调节器都有一定的失灵区，若调节误差的变化速度缓慢，以至于调节器不能察觉，纯微分调节器将不会动作，此时调节误差会不断累积却得不到校正。



4 PID调节原理

❖ **PID**是比例、积分、微分的缩写

Proportional-Integral-Differential

- ❖ 比例作用的输出与偏差大小成正比;
- ❖ 积分作用的输出变化速度与偏差成正比;
- ❖ 微分作用的输出与偏差变化速度成正比。



4 PID调节原理

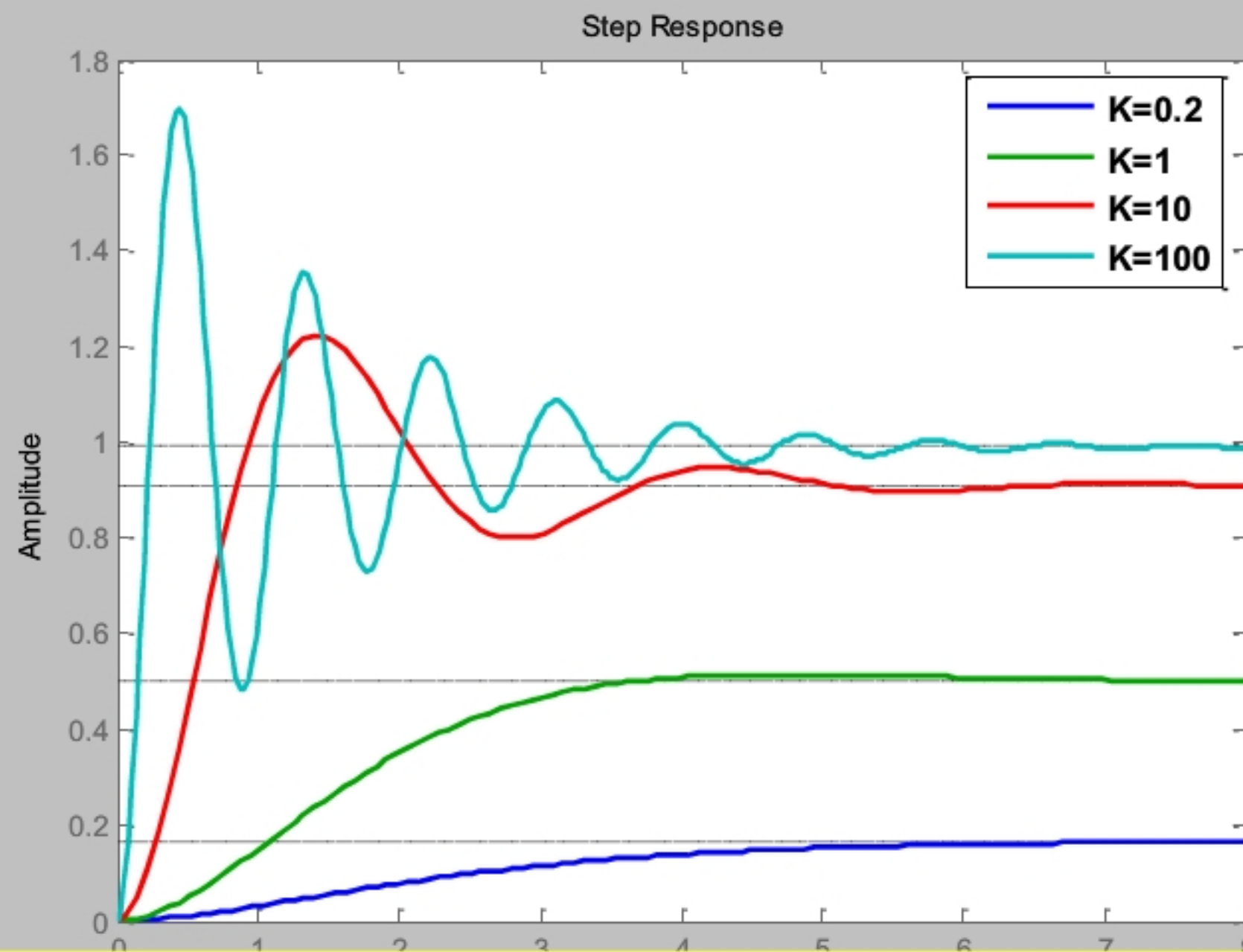
- ❖ **比例调节作用**：是按比例反应系统的偏差，系统一旦出现偏差，比例调节立即产生调节作用用以减少偏差。
- ❖ 比例作用大，可以加快调节，减少误差
- ❖ 但是过大的比例，使系统的稳定性下降，甚至造成系统的不稳定。



4 PID调节原理

$$G_K = \frac{K_p K}{(s+1)(2s+1)}$$

$$e(\infty) = \frac{1}{1+K_p K}$$



比例调节 **K** 的变化对控制效果的影响



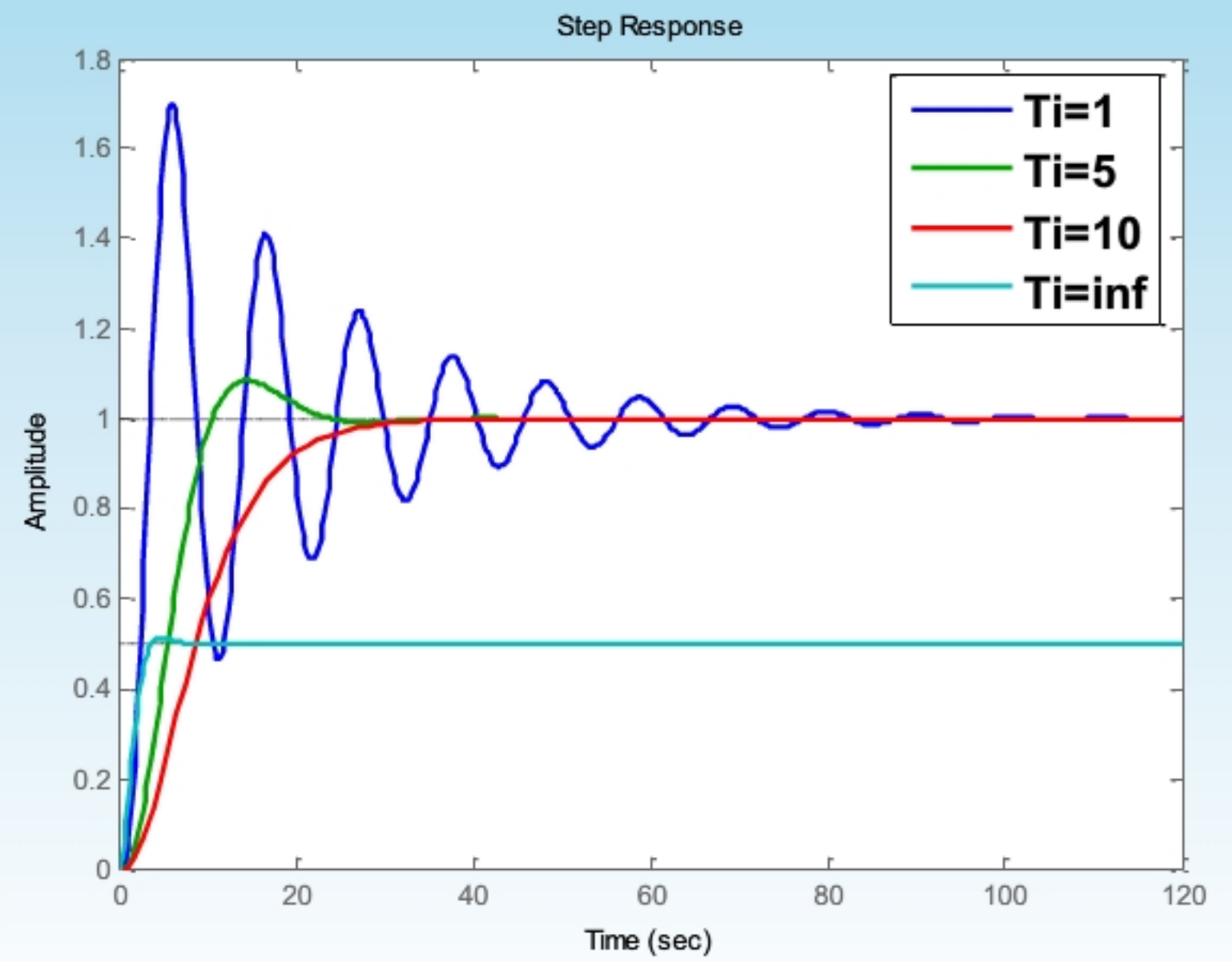
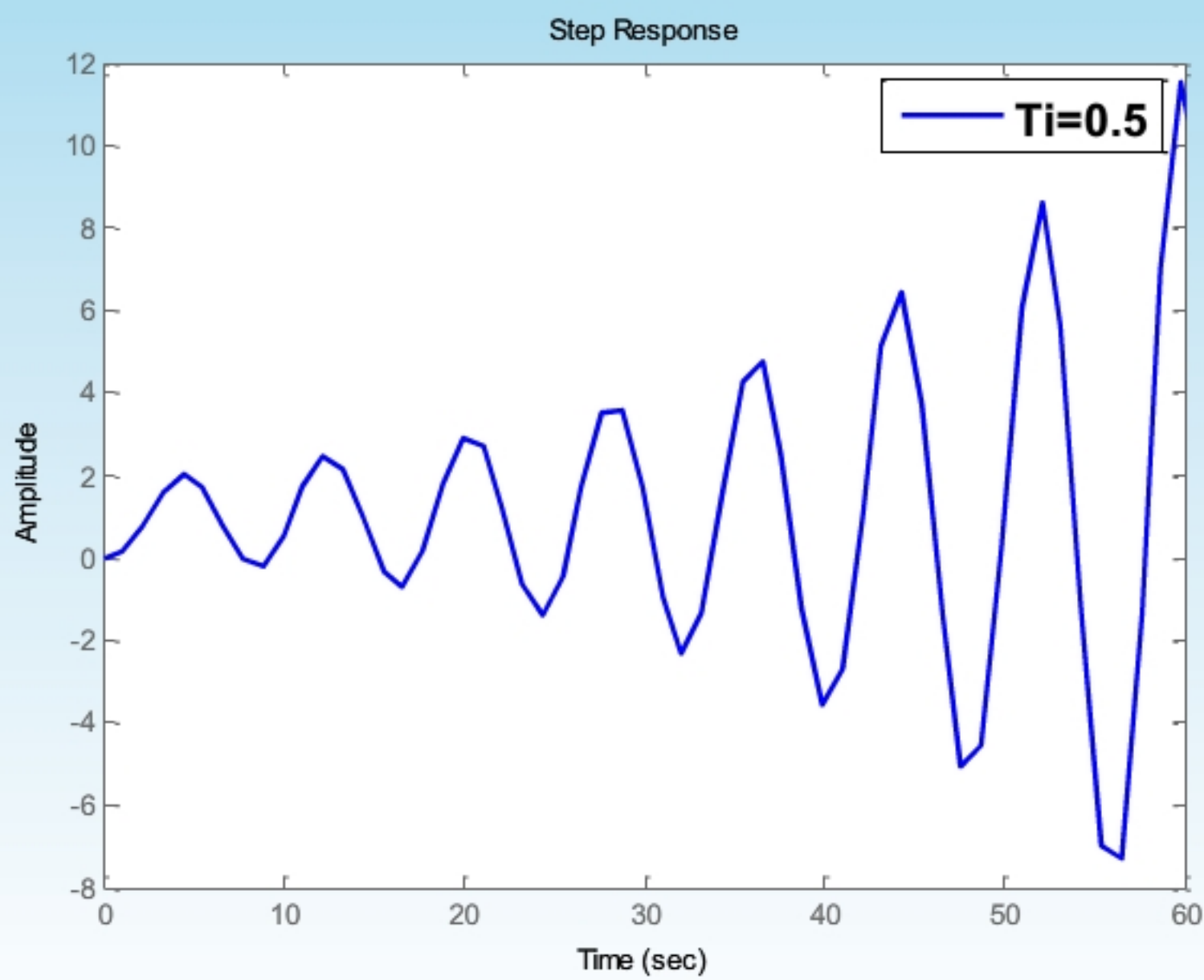
4 PID调节原理

- ❖ **积分调节作用**：是使系统消除**稳态误差**，提高无差度。因为有误差，积分调节就进行，直至无差，积分调节停止，积分调节输出一常值。
- ❖ 积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越小，积分作用就越强。反之 T_i 大则积分作用弱。
- ❖ 加入积分调节可使**系统稳定性下降**，**动态响应变慢**。
- ❖ 积分作用常与另两种调节规律结合，组成PI调节器或PID调节器。



4 PID调节原理

$$G_K = \frac{1}{T_I s (s+1) (2s+1)}$$



积分调节， T_i 的变化对控制效果的影响



4 PID调节原理

- ❖ **微分调节作用**：微分作用反映系统偏差信号的变化率，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，因此过强的微分调节，**对系统抗干扰不利**。
- ❖ 此外，微分反应的是变化率，而当输入没有变化时，微分作用输出为零。
- ❖ 微分作用不能单独使用，需要与另外两种调节规律相结合，组成PD或PID控制器。

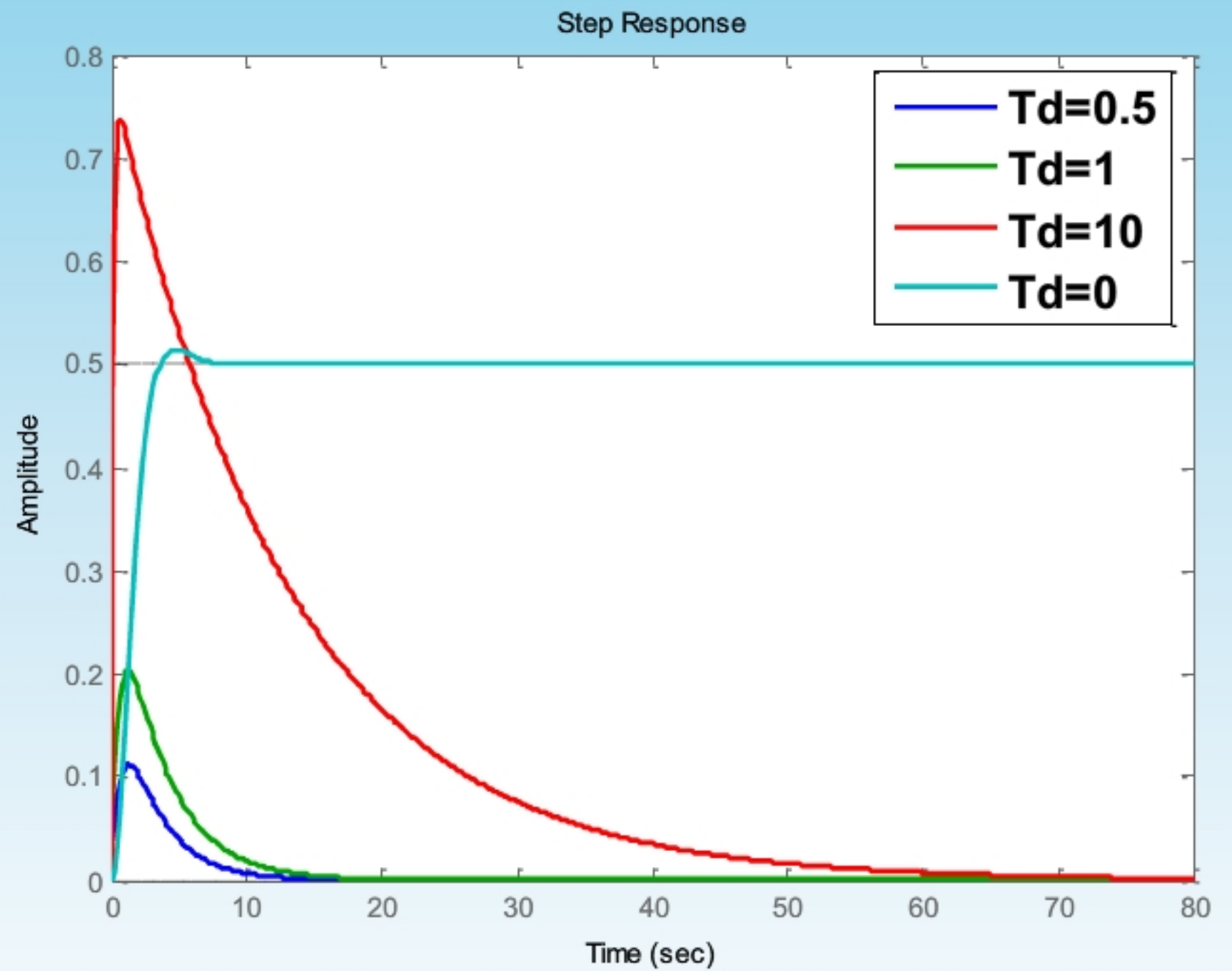


4 PID调节原理

$$G_K = \frac{T_d s}{(s+1)(2s+1)}$$

$$Y(s) = \frac{G_k(s)}{1+G_k(s)} R(s)$$

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{G_k(s)}{1+G_k(s)} \frac{1}{s} \right)$$



微分调节， T_d 的变化对控制效果的影响



4 PID调节原理

4.5 比例积分微分调节 (PID调节)

4.5.1 比例积分 (PI) 调节

- ❖ 积分调节可以消除静差,但有滞后现象,比例调节没有滞后现象,但存在静差。
- ❖ PI调节就是综合P、I两种调节的优点,利用P调节快速抵消干扰的影响,同时利用I调节消除残差。



4 PID调节原理

PI调节规律为：

$$u = K_p e + S_0 \int_0^t e dt \quad (4.14)$$

$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right) \quad (4.15)$$

式中 δ —— 比例带（可视情况取正值或负值）
 T_I —— 积分时间

δ 和 T_I 是PI调节器的两个重要参数。



4 PID调节原理

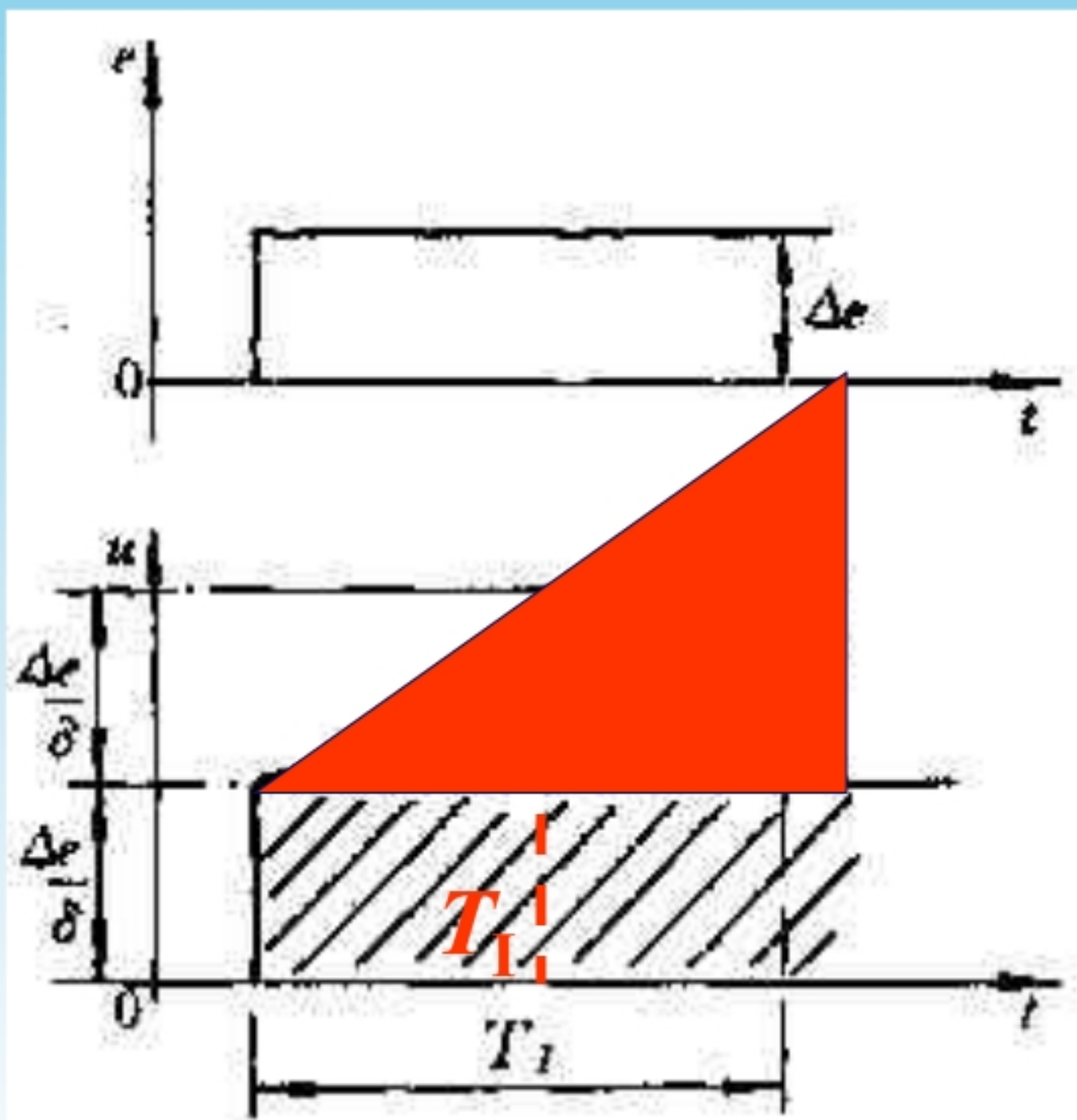


图4.10 PI调节器的阶跃响应

$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right)$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\delta} \left(\Delta e + \frac{1}{T_I} \cdot \Delta e \cdot t \right) \\ &= \frac{\Delta e}{\delta} + \frac{\Delta e}{\delta} \cdot \frac{1}{T_I} \cdot t \end{aligned}$$



4 PID调节原理

- ❖ 在施加阶跃输入的瞬间，调节器立即输出一个幅值为 $\Delta e / \delta$ 的阶跃，然后以固定速度 $\Delta e / \delta T_I$ 变化。当 $t = T_I$ 时，调节器的总输出为 $2 \Delta e / \delta$ 。输出的积分部分正好等于比例部分。
- ❖ T_I 可以衡量积分部分在总输出中所占的比重： T_I 愈小，积分部分所占的比重愈大。

$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right)$$



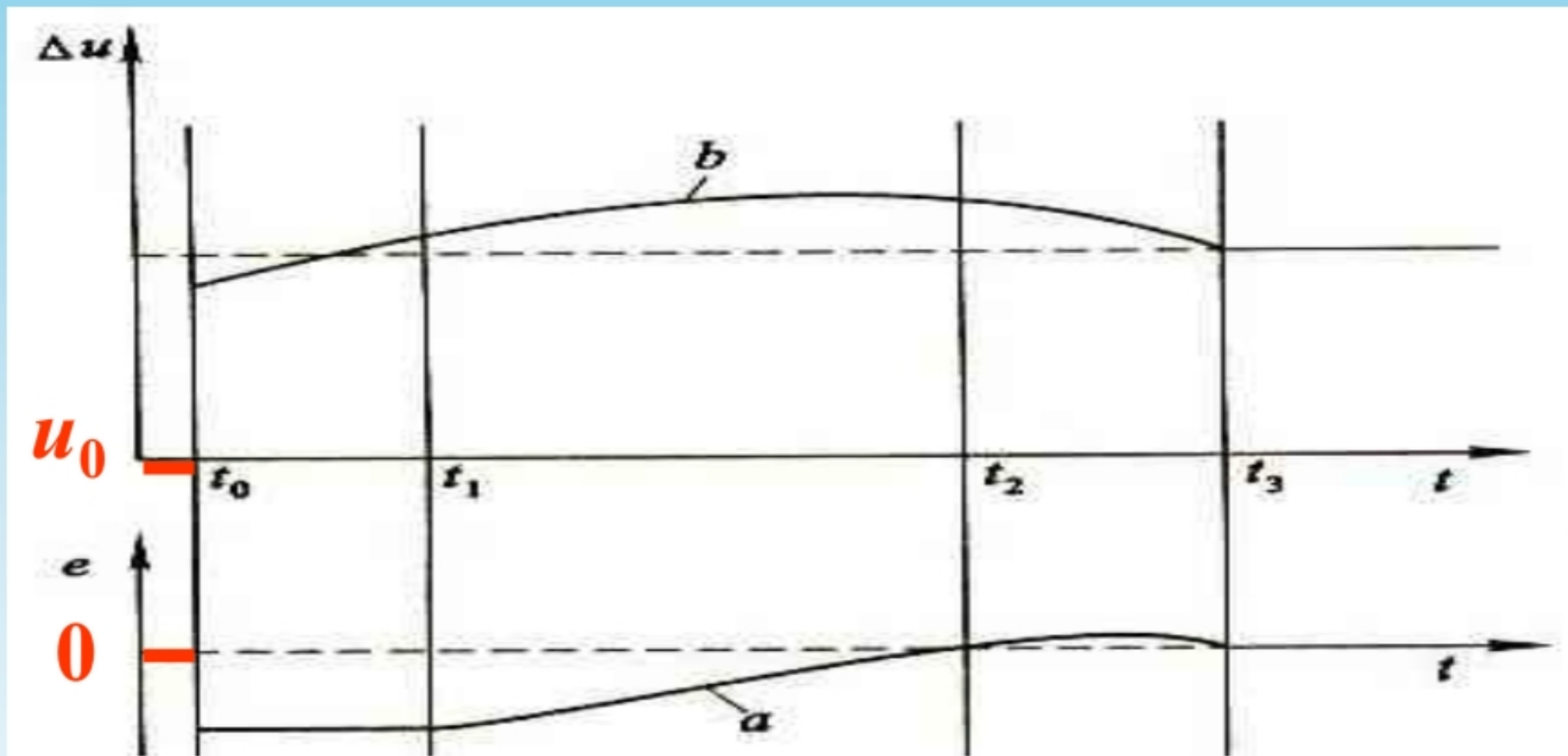
4 PID调节原理

比例积分调节过程

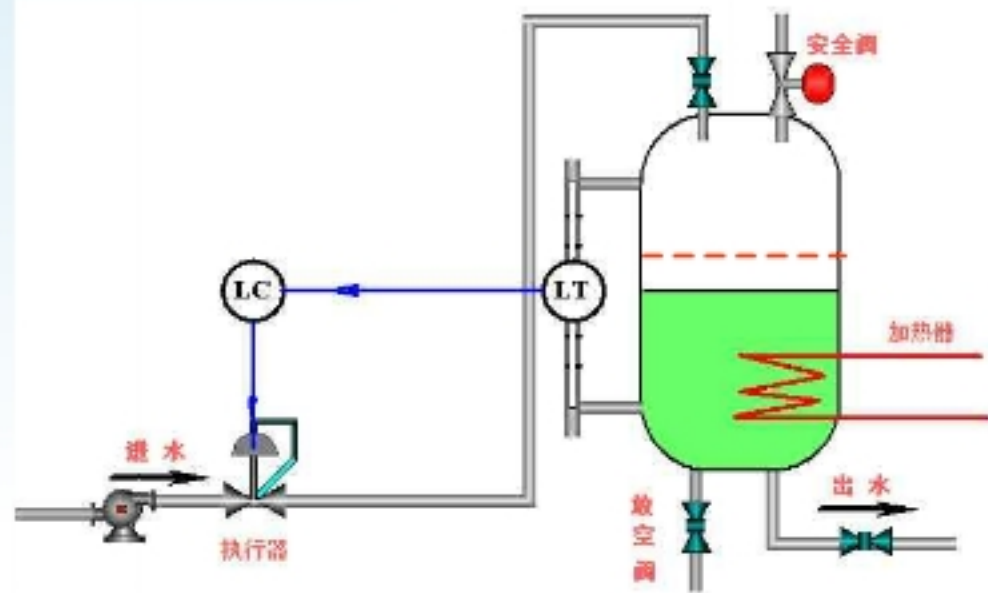
- ❖ 残差的消除是PI调节器积分动作的结果。
- ❖ 积分部分的阀位输出使调节阀开度最终得以到达抵消扰动所需的位置。
- ❖ 比例部分的阀位输出 U_p 在调节过程的初始阶段起较大作用，但调节过程结束后又返回到扰动发生前的数值。



4 PID调节原理



PI 调节器对过程负荷变化的响应



负荷变化前 ($t < t_0$) 被控系统稳定, 控制偏差为零, 调节器输出保持某恒定值。



4 PID调节原理

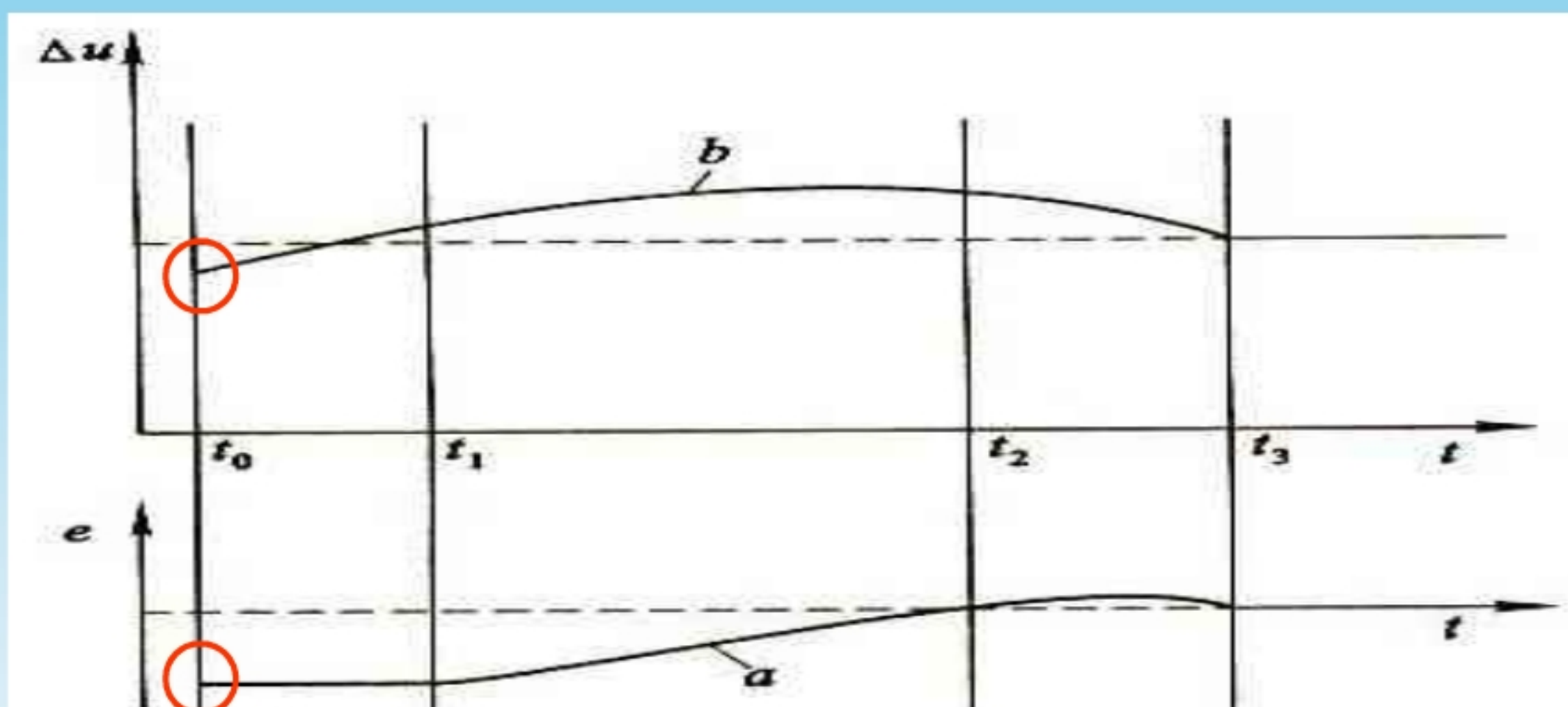
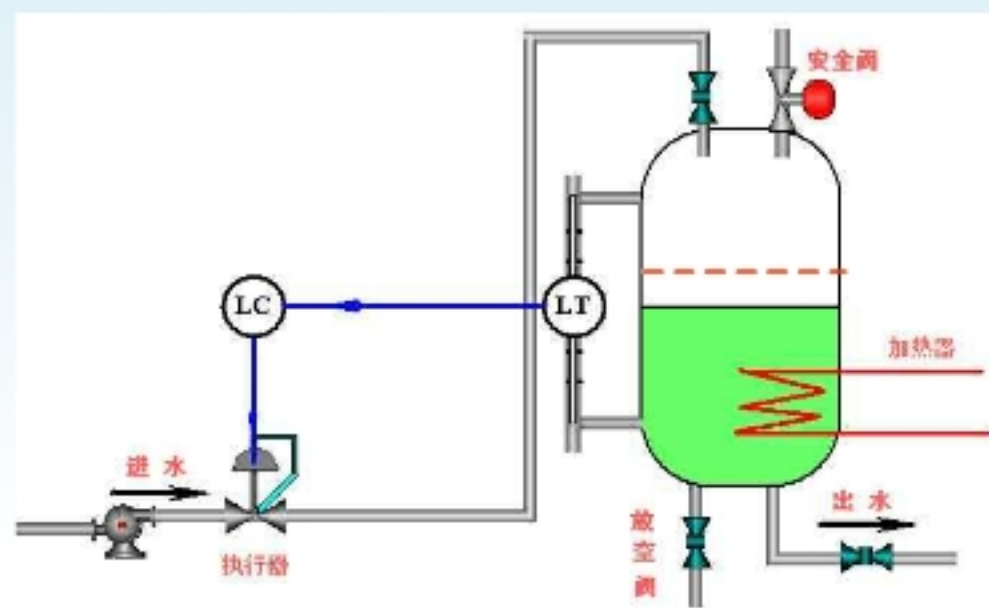


图4.11 PI 调节器对过程负荷变化的响应

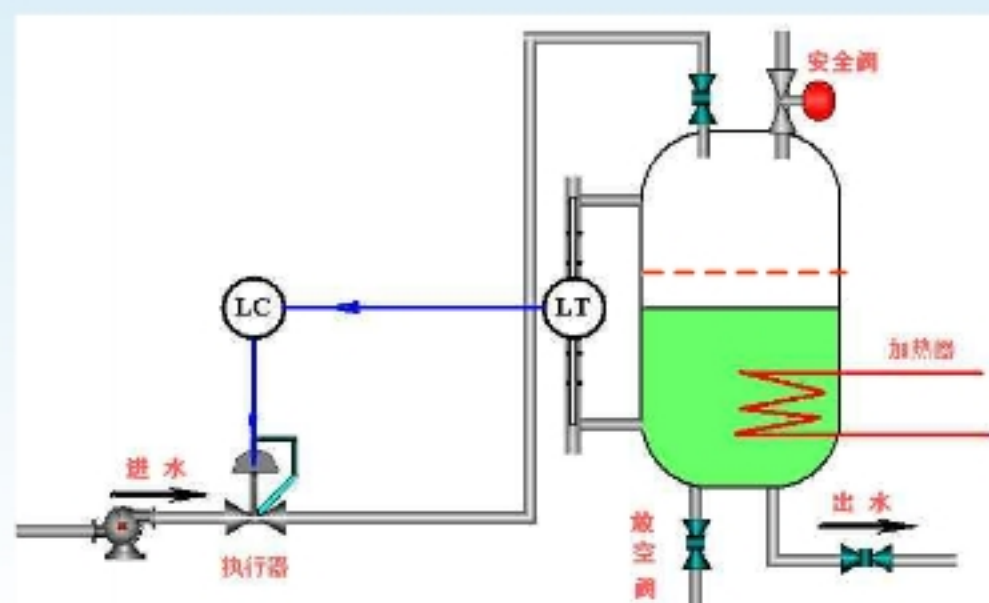
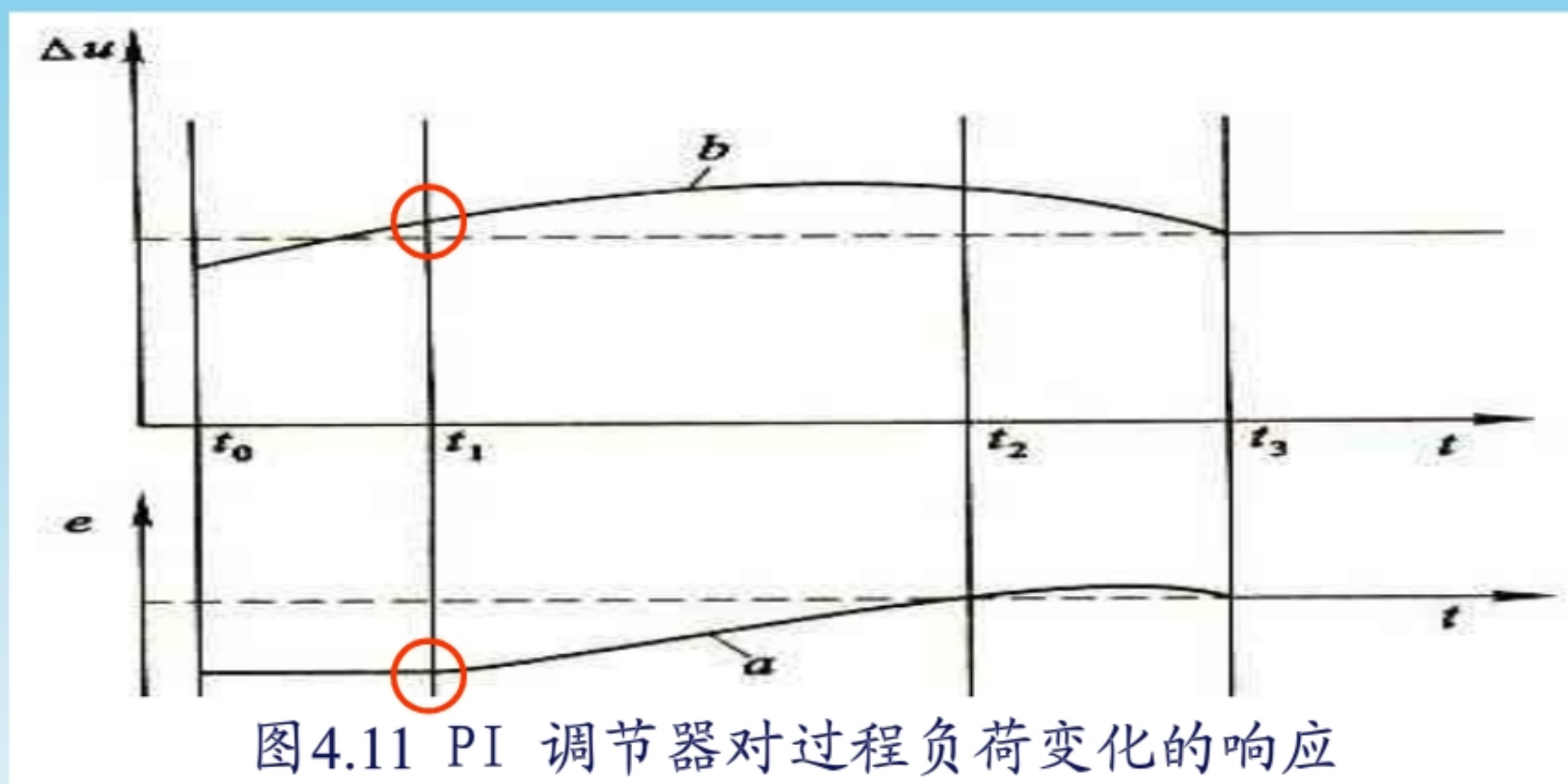


$t=t_0$ 时刻，系统负荷发生阶跃变化，**P**调节立即响应偏差变化，产生正的跃变，**I**调节则从零开始累计偏差。

此后，在**PI**的共同作用下，调节的总输出持续增加。



4 PID调节原理



在 $t=t_1$ 时刻，系统开始响应，控制偏差开始减小，**P**调节紧跟着减小，**I**调节因偏差仍存在且方向不变，所以继续增加

PI调节的综合结果 Δu 也仍持续增大使控制偏差进一步减小



4 PID调节原理

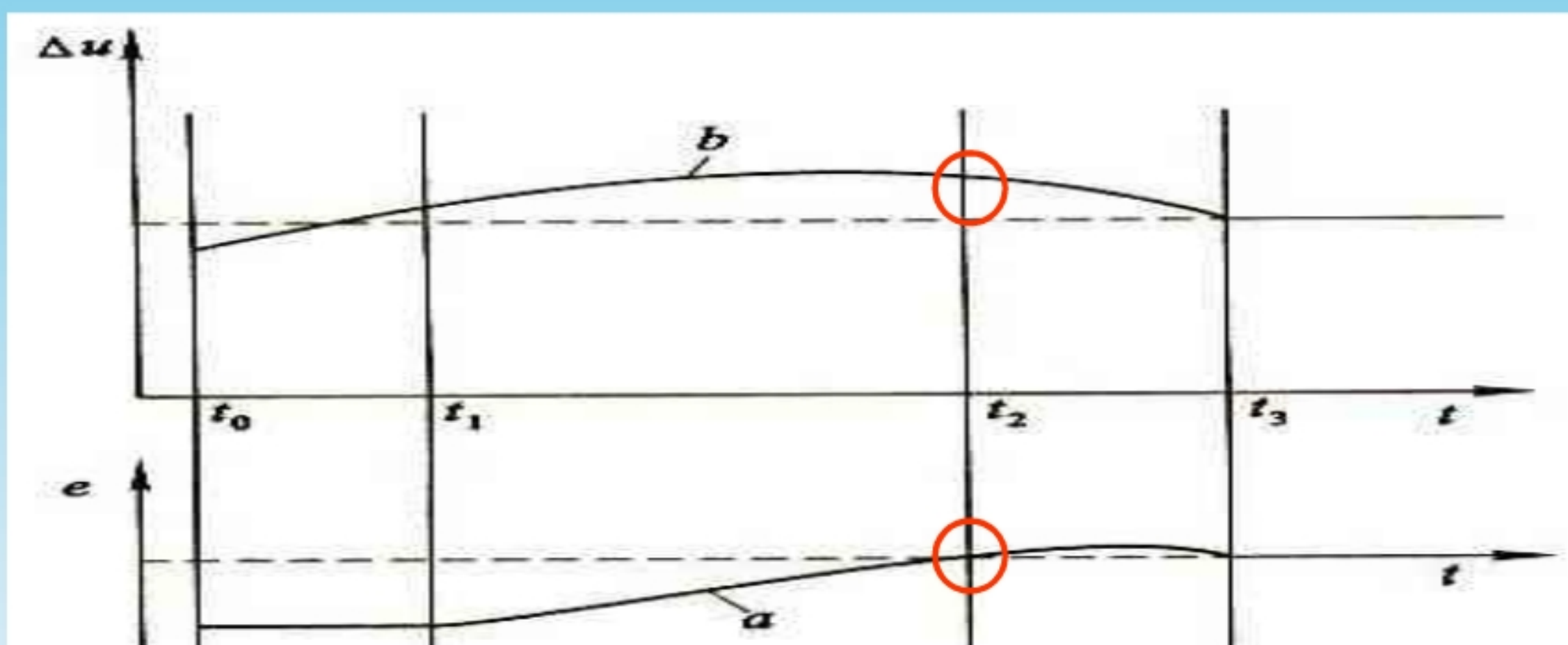
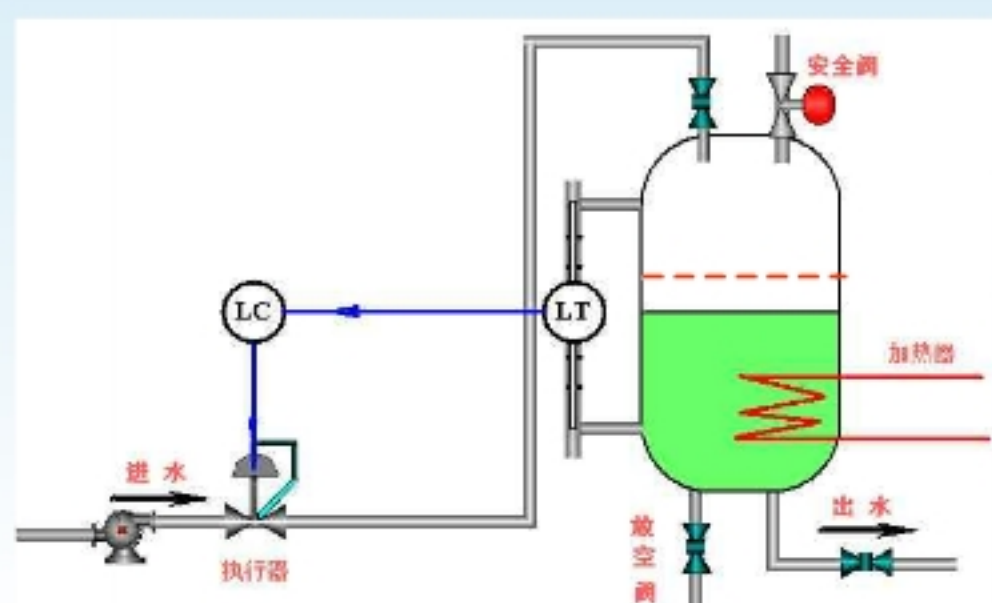


图4.11 PI 调节器对过程负荷变化的响应



$t=t_2$ 时刻，偏差减小至零，P调节作用彻底消失，I调节也停止增长
如果积分时间足够小，此时调节器的输出将大于所要求的值，致使系统产生反向偏差，也即超调。



4 PID调节原理

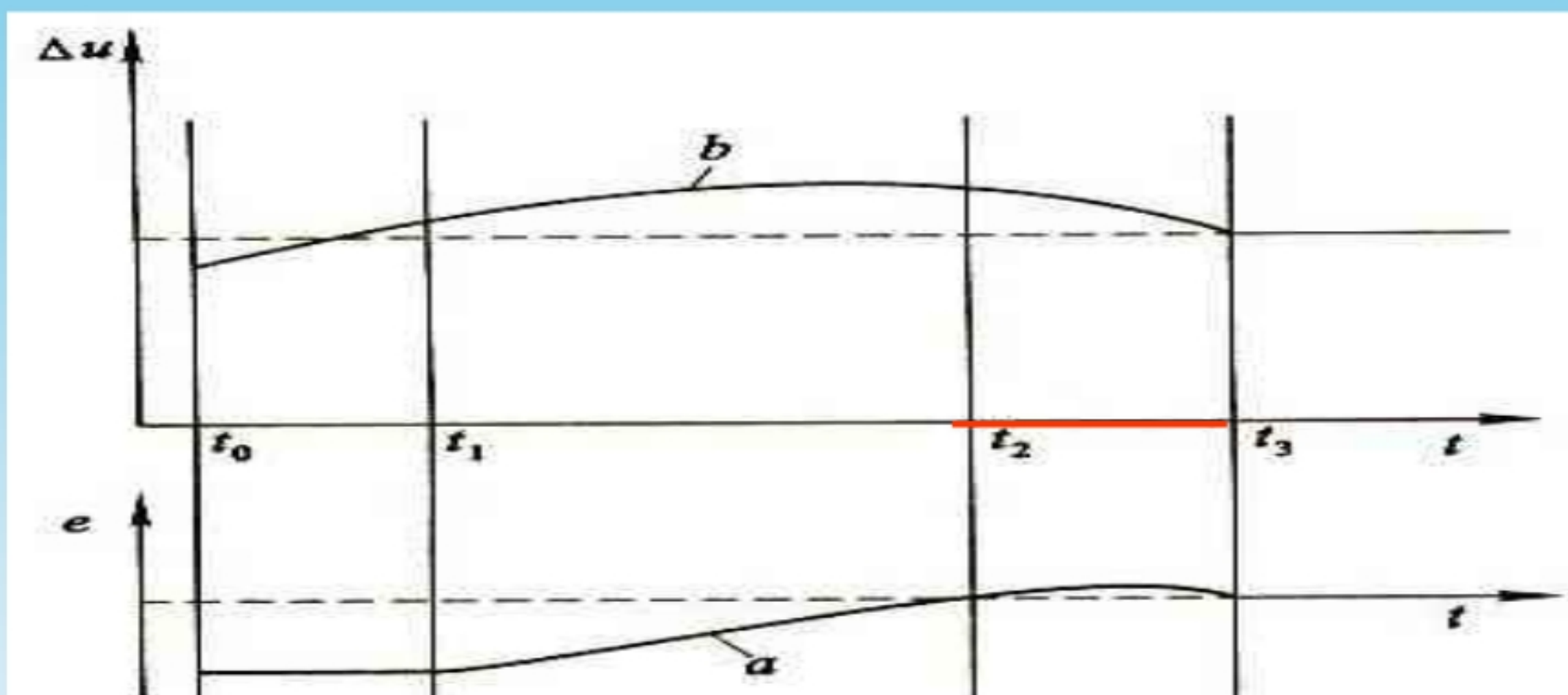
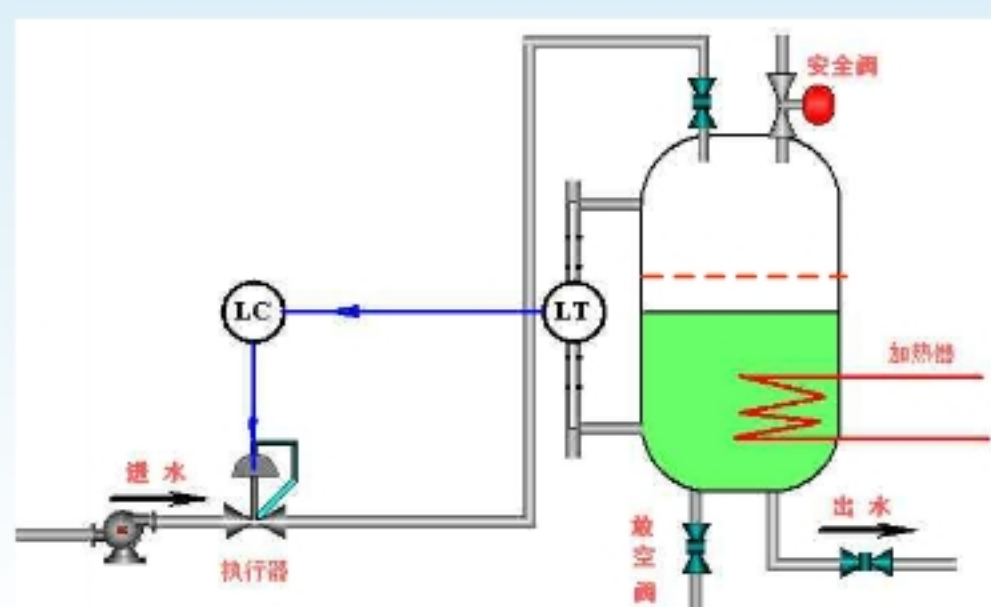


图4.11 PI

$t_2 \sim t_3$ 阶段，偏差反向，**P**调节作用反向，**I**调节作用也由增加变为减小，**PI**调节的整体作用表现为减小，直至从超调位置下降到系统要求的作用点，即图中的 $t=t_3$ 点处，此时偏差从超调处回落到零，系统达到新的平衡。



4 PID调节原理

由上分析

- ❖ PI调节引入积分动作消除了系统余差，却降低了原有系统的稳定性。
- ❖ 调节过程中的超调趋势随比例增益的增大和积分时间的减小而增大，因此PI调节的比例增益要设置得比纯P调节小，对积分时间的设置也应有一定的限制。



4 PID调节原理

- ❖ PI调节在比例带不变的情况下，减小积分时间 T_I ，将使控制系统稳定性降低、振荡加剧、调节过程加快、振荡频率升高。

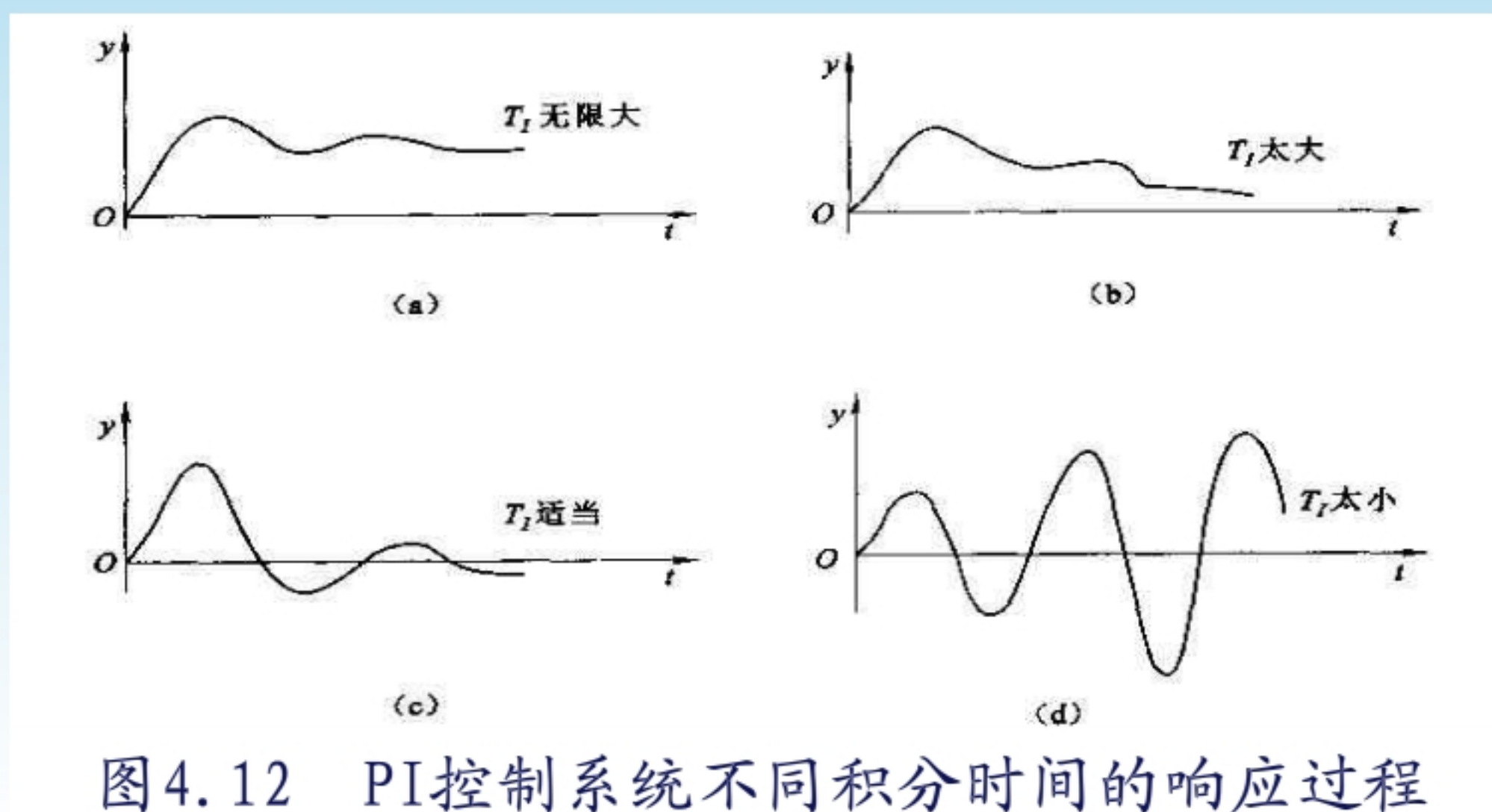


图4.12 PI控制系统不同积分时间的响应过程



4 PID调节原理

❖ 比例积分调节的特点:

- ❖ 具有比例调节作用反应快、无滞后的优点，可以加快调整作用，缩短调节时间，又具有积分调节的优点，可以消除静差。
- ❖ 对于一般调节对象，均可用比例积分调节，比例带和积分时间选择合适，基本可以满足生产工艺要求。



4 PID调节原理

积分饱和现象与抗积分饱和的措施

❖ 积分饱和现象

$$u_c = S_0 \int_0^t e dt$$

$$u_c(n) = S_0 \sum_{k=1}^n e(k)$$

$$u_c(n+1) = S_0 \sum_{k=1}^n e(k) + S_0 e(n+1)$$

$u_c(n+1) > u_c(n)$, 当误差 $e(n+1)$ 方向不变时

$u_c(n+m) > \text{阀门的开度极限}$

执行器进入深度饱和

当误差反向时执行器开始退饱和

退出饱和后执行器才能响应误差的变化

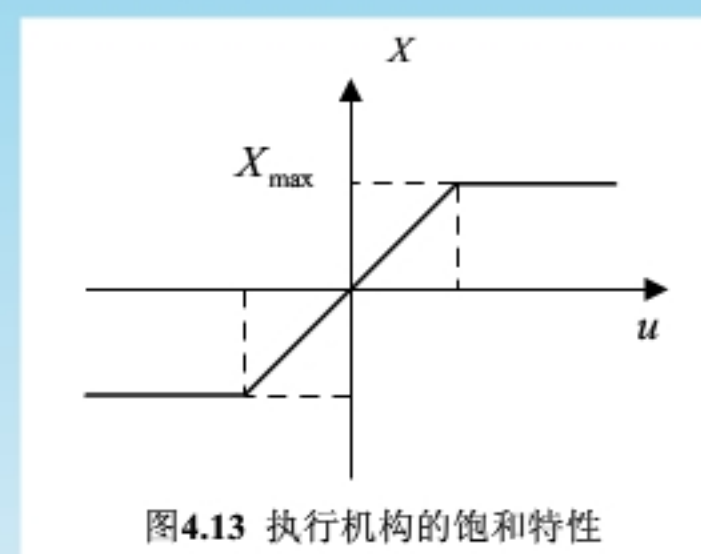


图4.13 执行机构的饱和特性



4 PID调节原理

❖ 积分饱和现象

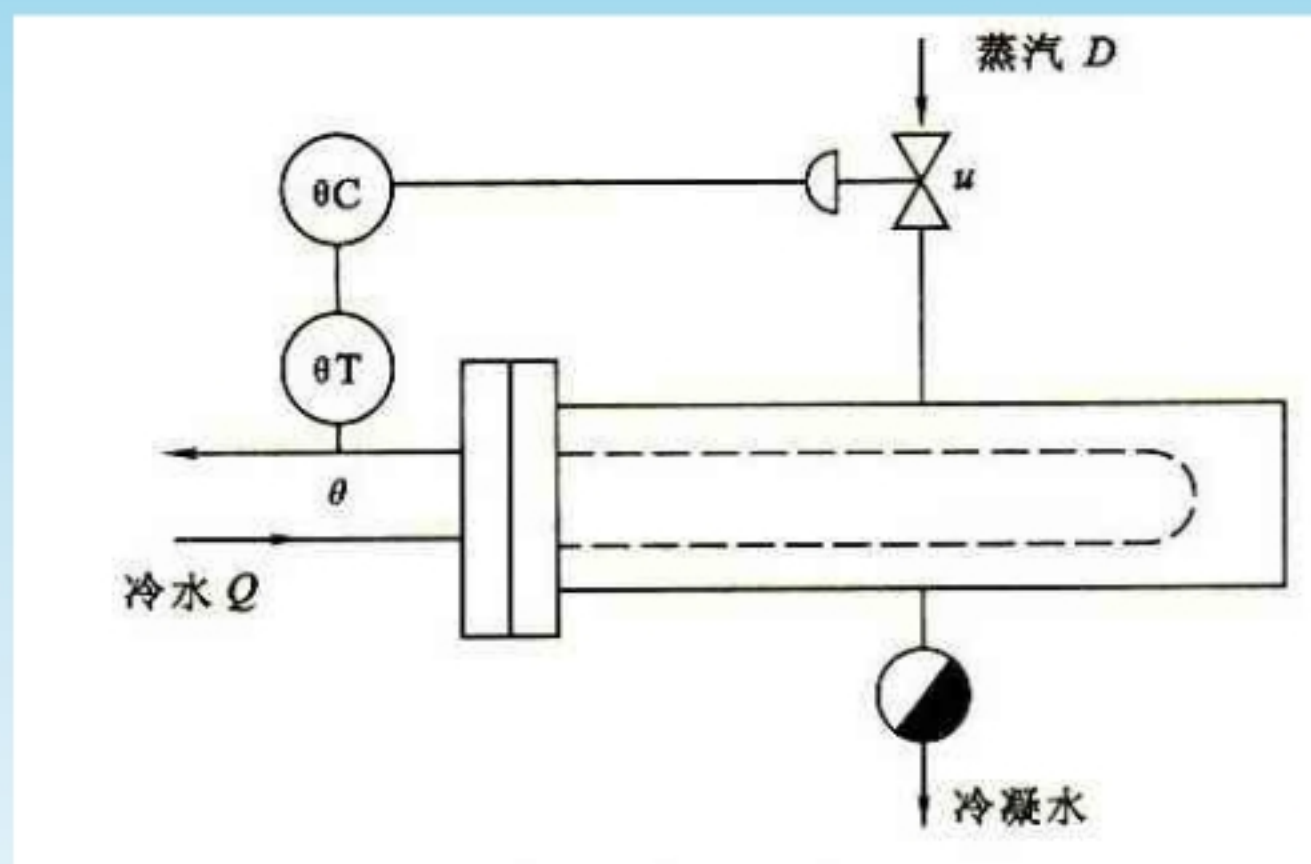


图4.14 加热器出口水温控制系统

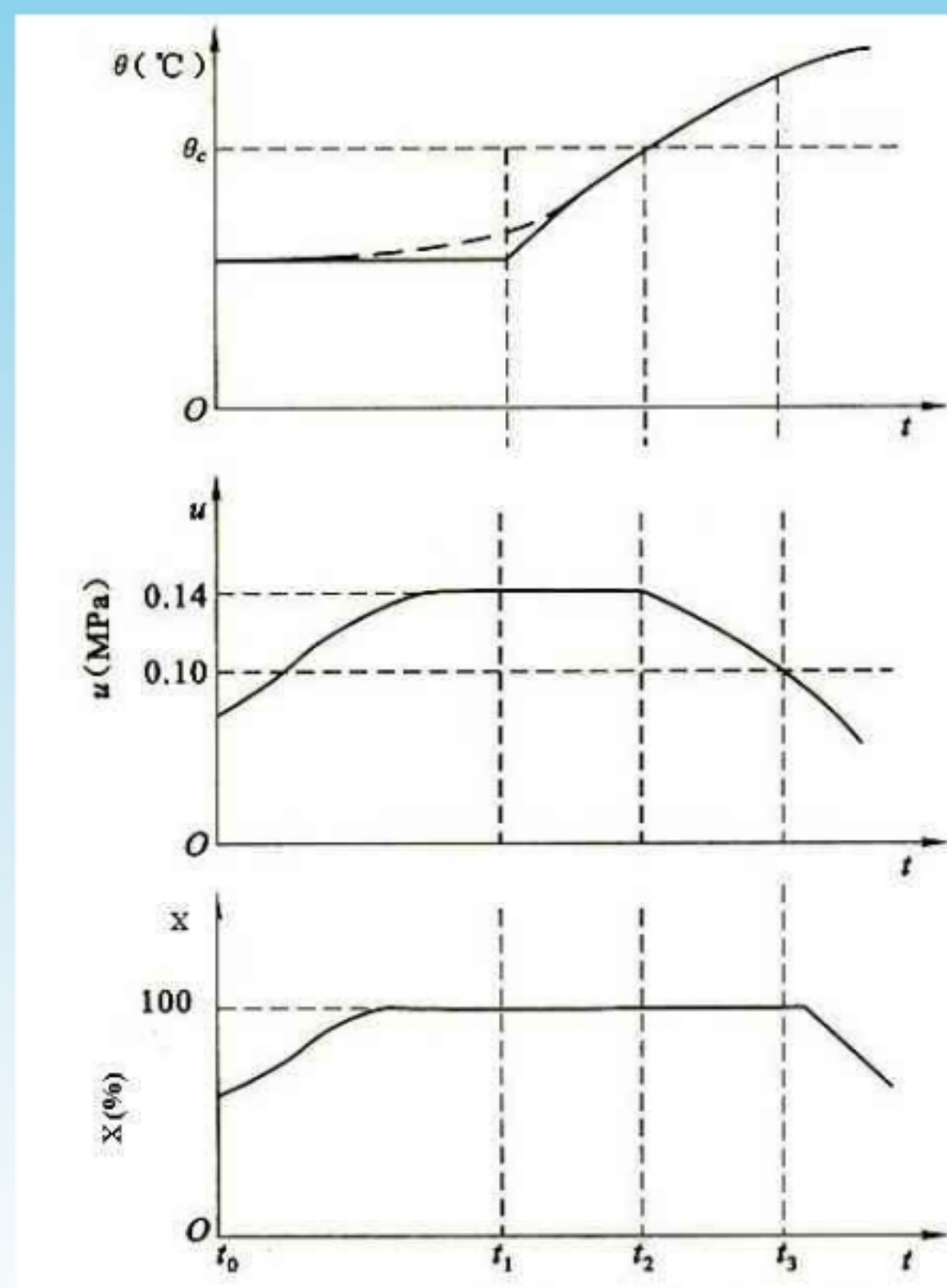


图4.15 温度比例积分控制系统积分饱和



4 PID调节原理

抗积分饱和的措施

①限制PI调节器的输出

- $u_{PI} > \text{设定限值时}$, $u_{PI} = u_{\max}$
- 结果: 这样有可能在正常操作中不能消除系统的余差

②积分分离法

- $e > \text{设定限值时}$, 改用纯P调节
- 结果: 既不会积分饱和又能在小偏差时利用积分作用消除偏差

③遇限削弱积分法

- $u_{PI} > \text{设定限值时}$, 只累加负偏差, 反之亦然
- 结果: 可避免控制量长时间停留在饱和区



4 PID调节原理

4.5.2 比例微分 (PD) 调节规律

PD调节器的动作规律是

$$u = K_p e + S_2 \frac{de}{dt} \quad (4.16)$$

$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (4.17)$$

式中 δ — 比例带，可视情况取正值或负值

T_D — 微分时间



4 PID调节原理

工业上实际采用的PD调节器的传递函数是：

$$G_c(s) = \frac{1}{\delta} \frac{T_D s + 1}{\frac{T_D}{K_D} s + 1} \quad (4.19)$$

式中 K_D — 微分增益

相应的单位阶跃响应为：

$$u = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta} (K_D - 1) \exp\left(-\frac{t}{T_D / K_D}\right) \quad (4.20)$$



4 PID调节原理

$$u = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta} (K_D - 1) \exp\left(-\frac{t}{T_D / K_D}\right) \quad (4.20)$$

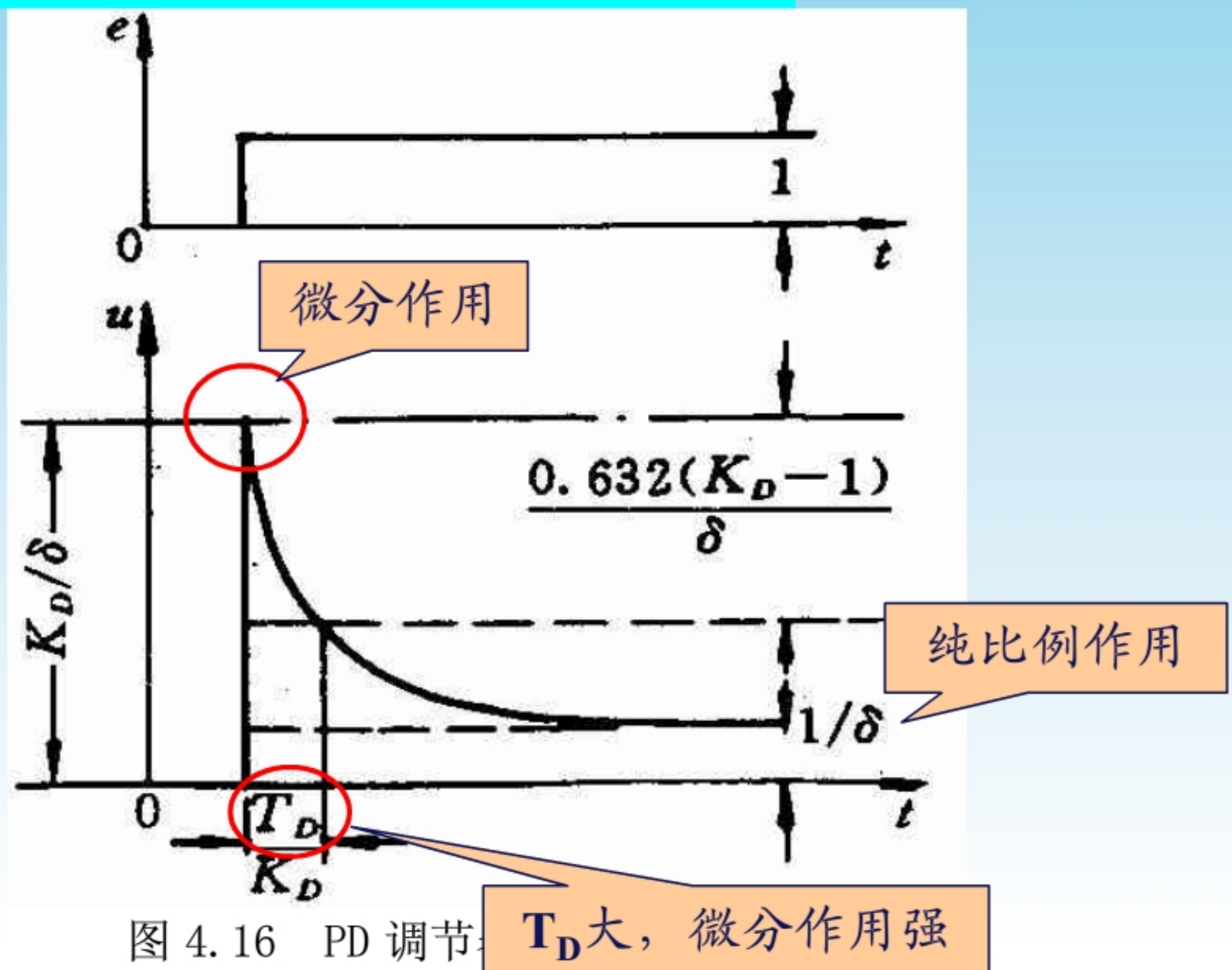


图 4.16 PD 调节

T_D 大, 微分作用强



4 PID调节原理

说明:

- ❖ 微分作用的强弱用微分时间 T_D 来衡量
 - 微分时间 T_D 越大，微分作用越强，超前时间越大。
- ❖ 理想的微分调节是不能单独使用的，它总是依附于比例调节或比例积分调节的。



4 PID调节原理

根据PD调节器的斜坡响应也可以单独测定它的微分时间 T_D

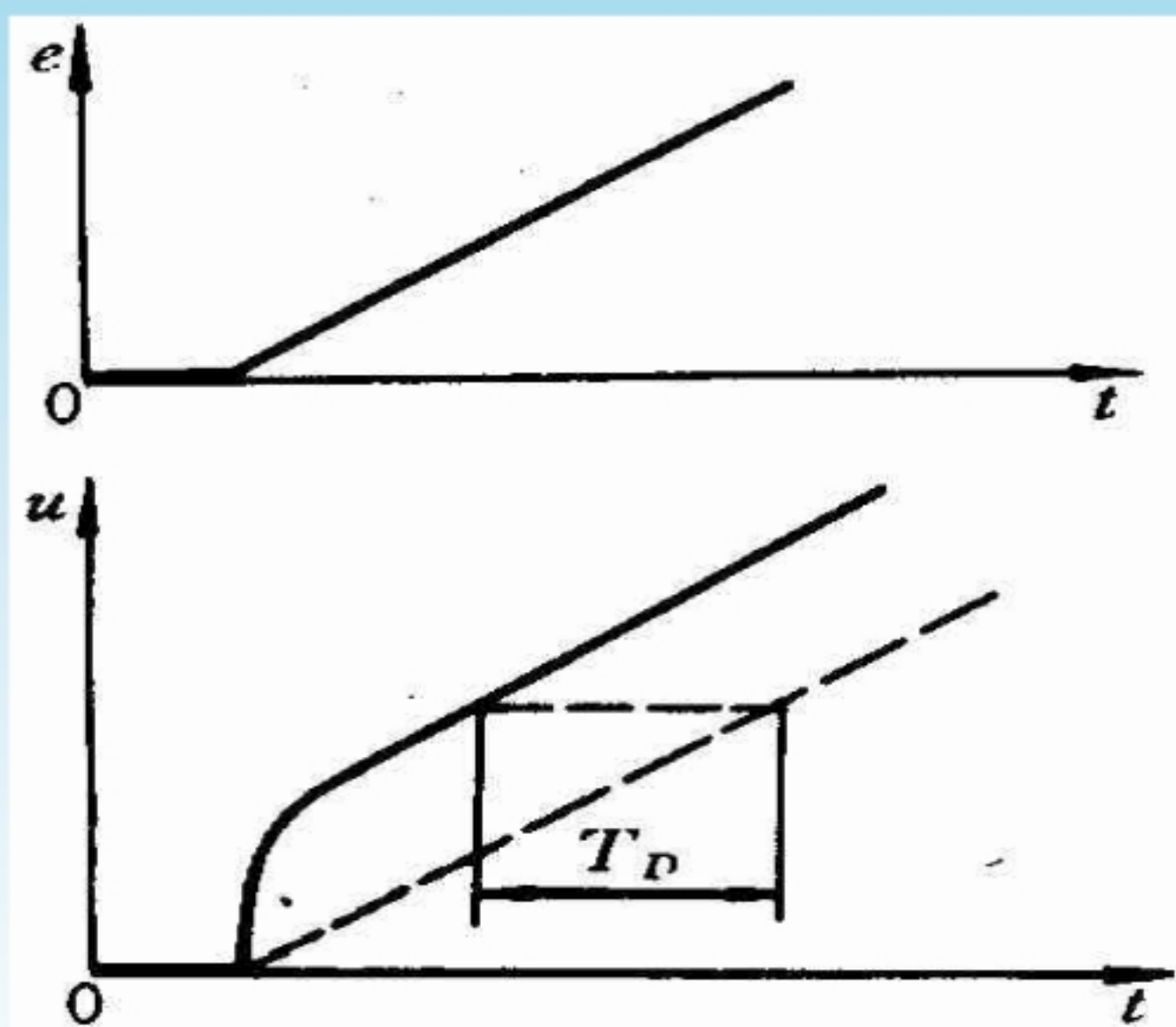


图 4.17 PD 调节器的斜坡响应

如果 $T_D = 0$ 即没有微分动作，那么输出 u 将按虚线变化。微分动作的引入使输出的变化提前一段时间发生，而这段时间就等于 T_D 。

PD调节器有导前作用，其导前时间即是微分时间 T_D 。



4 PID调节原理

比例微分调节的特点

❖ PD调节也是有差调节

∵ 在稳态下， $de/dt = 0$ ，PD调节器的微分部分输出为零，因此，此时PD调节与P调节相同。

❖ 微分调节有提高控制系统稳定性的作用

∵ 微分调节动作总是力图抑制被调量的振荡

- 引入微分动作要适度，当 T_D 超出某一上限值后，系统反而变得不稳定

❖ 适度引入微分动作可以允许稍许减小比例带

- 这样可以减小残差、减小短期最大偏差、提高振荡频率同时保持衰减率不变。



4 PID调节原理

比例微分调节的特点（续）

- ❖ 微分调节也有不利之处：
 - 微分动作太强容易导致调节阀开度向两端饱和
- ❖ 在PD调节中总是以比例动作为主，微分动作只能起辅助调节作用。
- ❖ PD调节器的抗干扰能力很差
 - 只能应用于被调量的变化非常平稳的过程，一般不用于流量和液位控制系统。
- ❖ 微分调节动作对于纯迟延过程是无效的。



4 PID调节原理

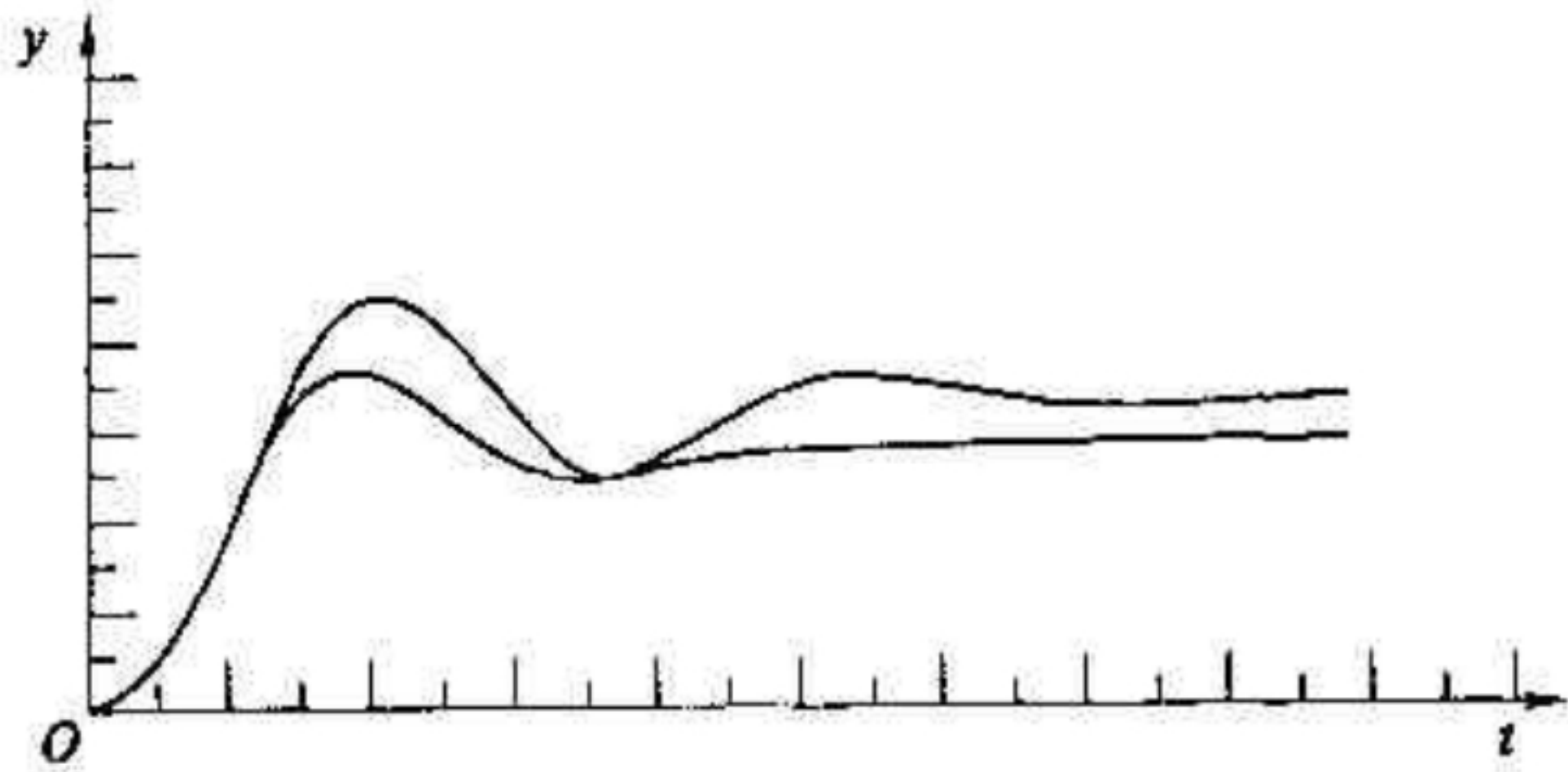
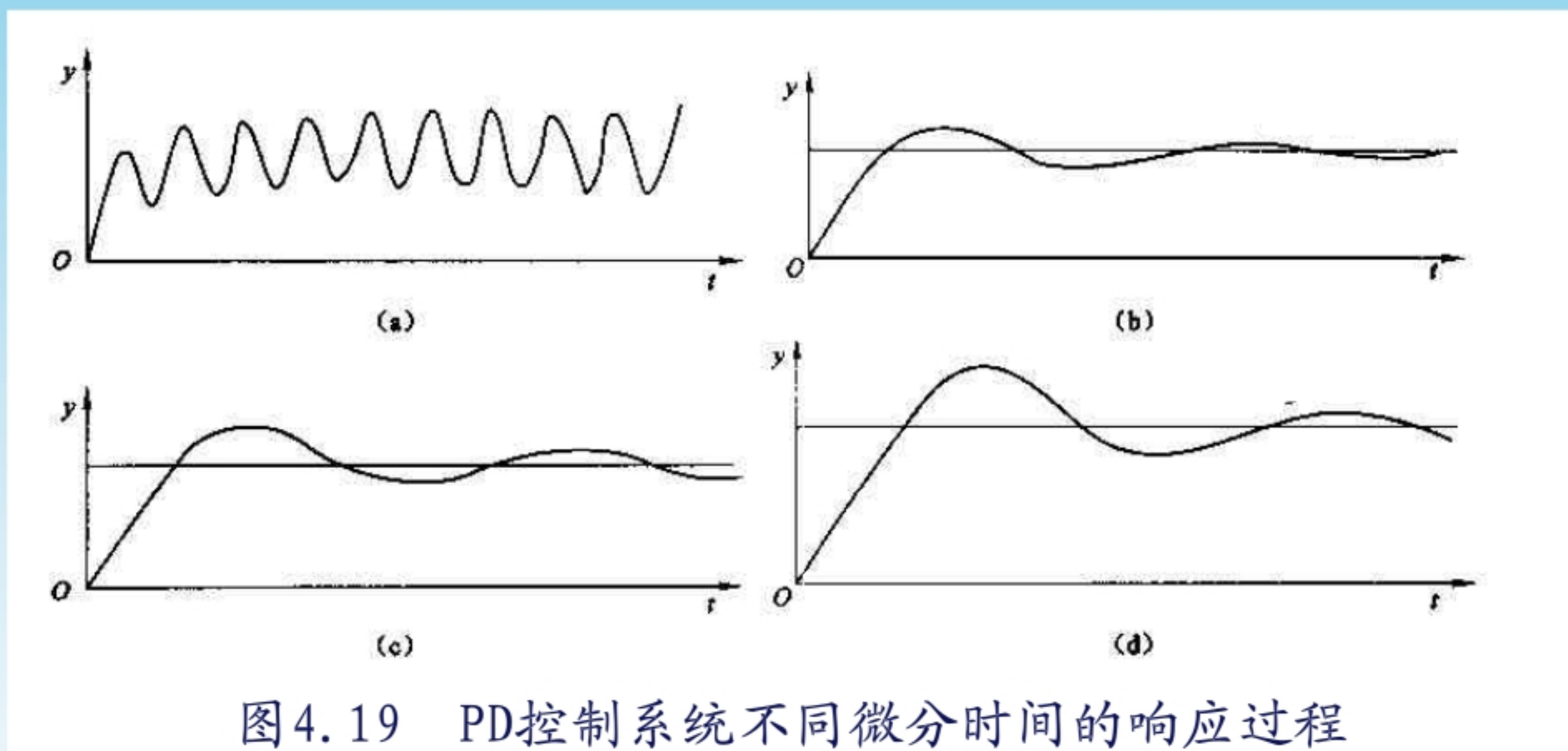


图4.18 P调节系统和PD调节系统过程的比较



4 PID调节原理



4 PID调节原理

比例积分微分(PID) 调节规律及其基本特征

❖ PID调节:

——将比例、积分、微分三种调节作用结合起来的调节。

❖ PID调节器的动作规律是:

$$u = K_p e + S_0 \int_0^t e dt + S_2 \frac{de}{dt} \quad (4.21)$$

$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (4.22)$$

❖ PID调节的三个特征参数

——比例带 δ 、积分时间 T_I 、微分时间 T_D



4 PID调节原理

PID调节器的传递函数物理上不能实现

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.23)$$

工业上实际采用的PID调节器，如DDZ型调节器，其调节律为

$$\mathbf{G}_c(s) = \mathbf{K}_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{1 + T_d s}{1 + \frac{T_d}{K_d} s} \right] \quad (4.25)$$



4 PID调节原理

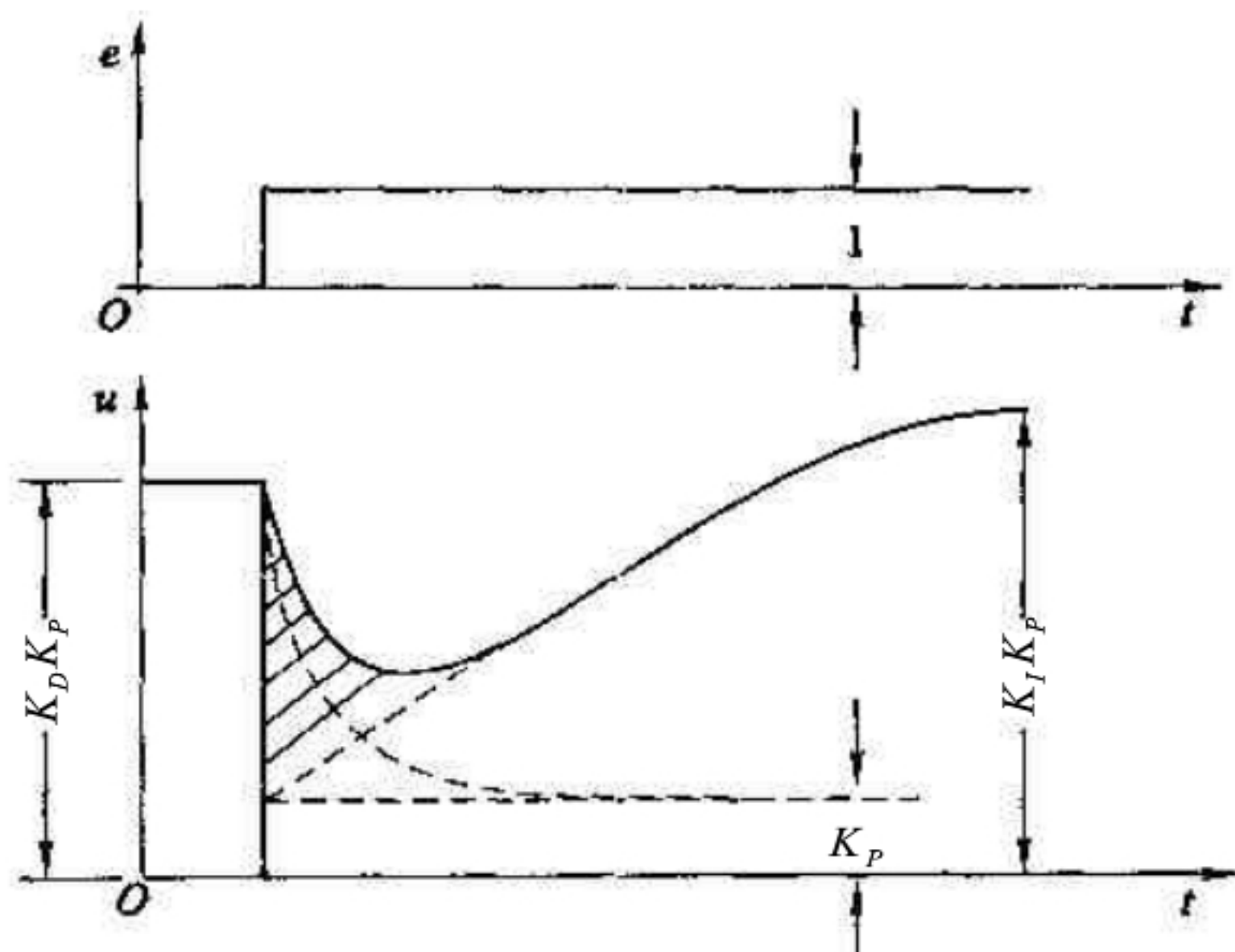
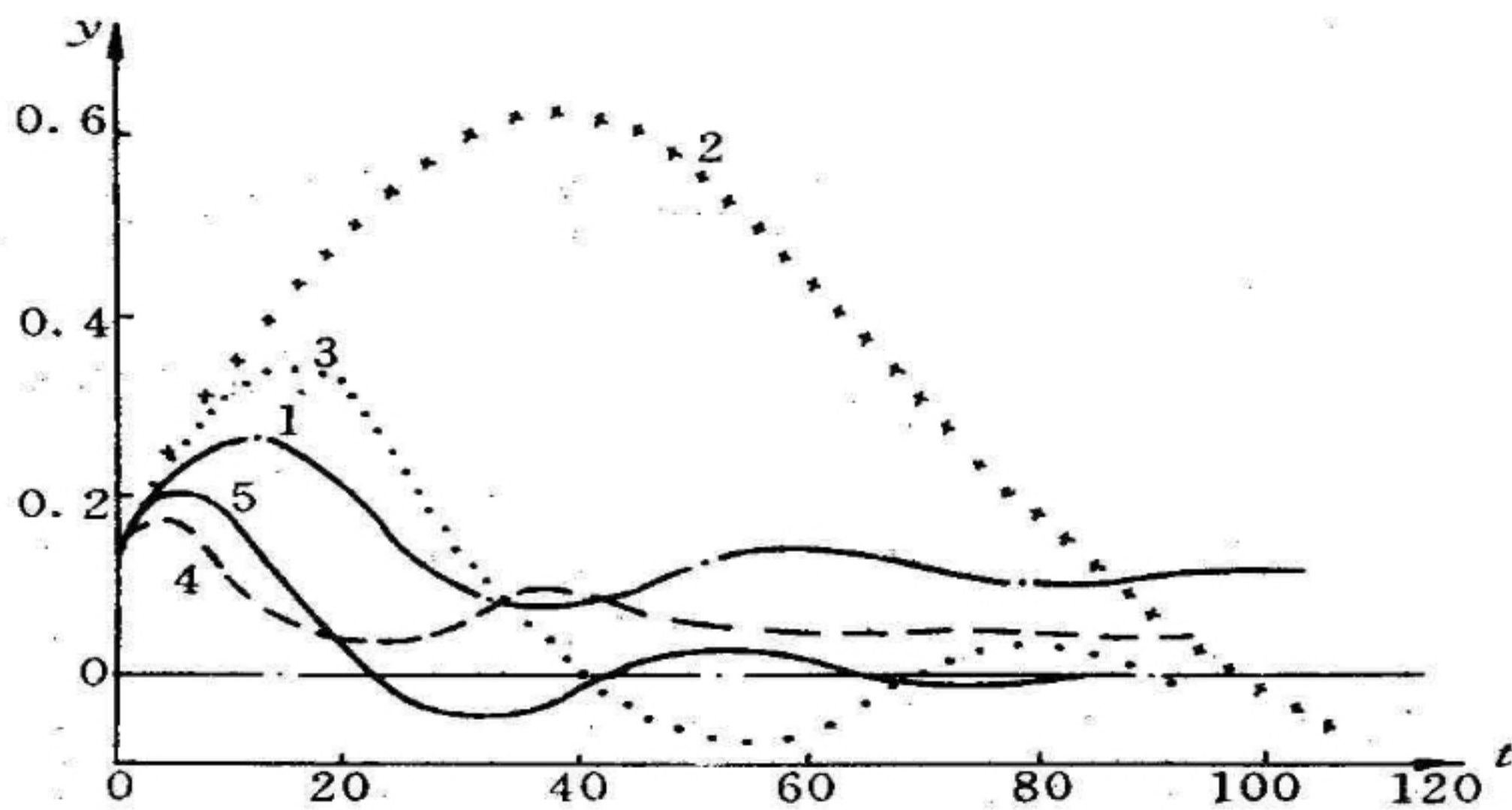


图4.20 工业PID调节器单位阶跃响应

图中的阴影部分面积代表微分作用的强弱

4 PID调节原理



各种调节动作对应的响应过程

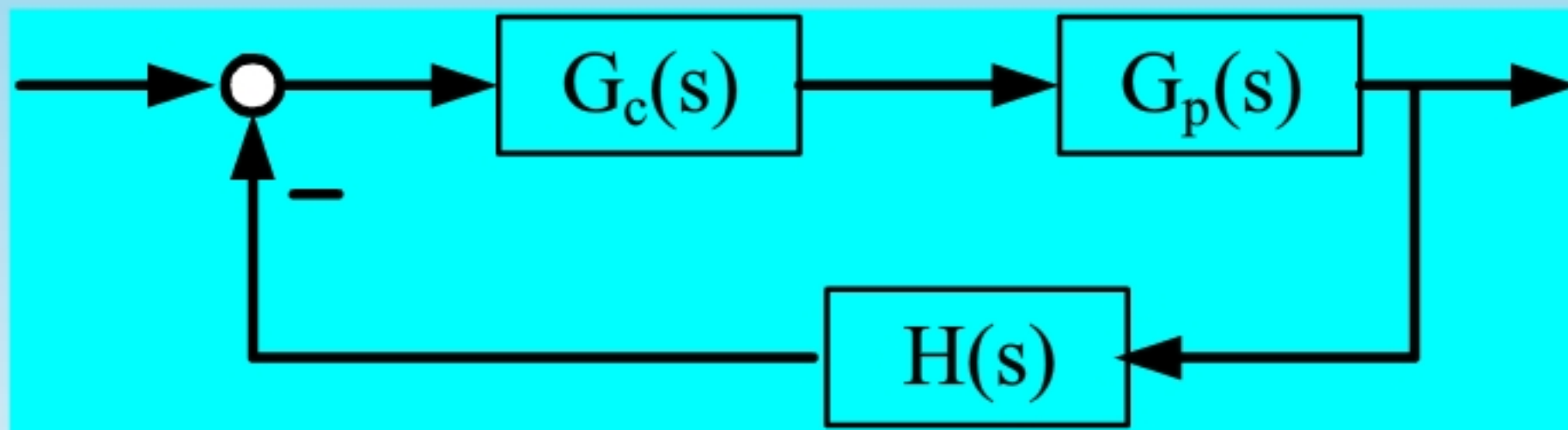
1—比例调节；2—积分调节；3—比例积分调节

4—比例微分调节；5—比例积分微分调节



4 PID调节原理

❖ 一组MATLAB仿真试验



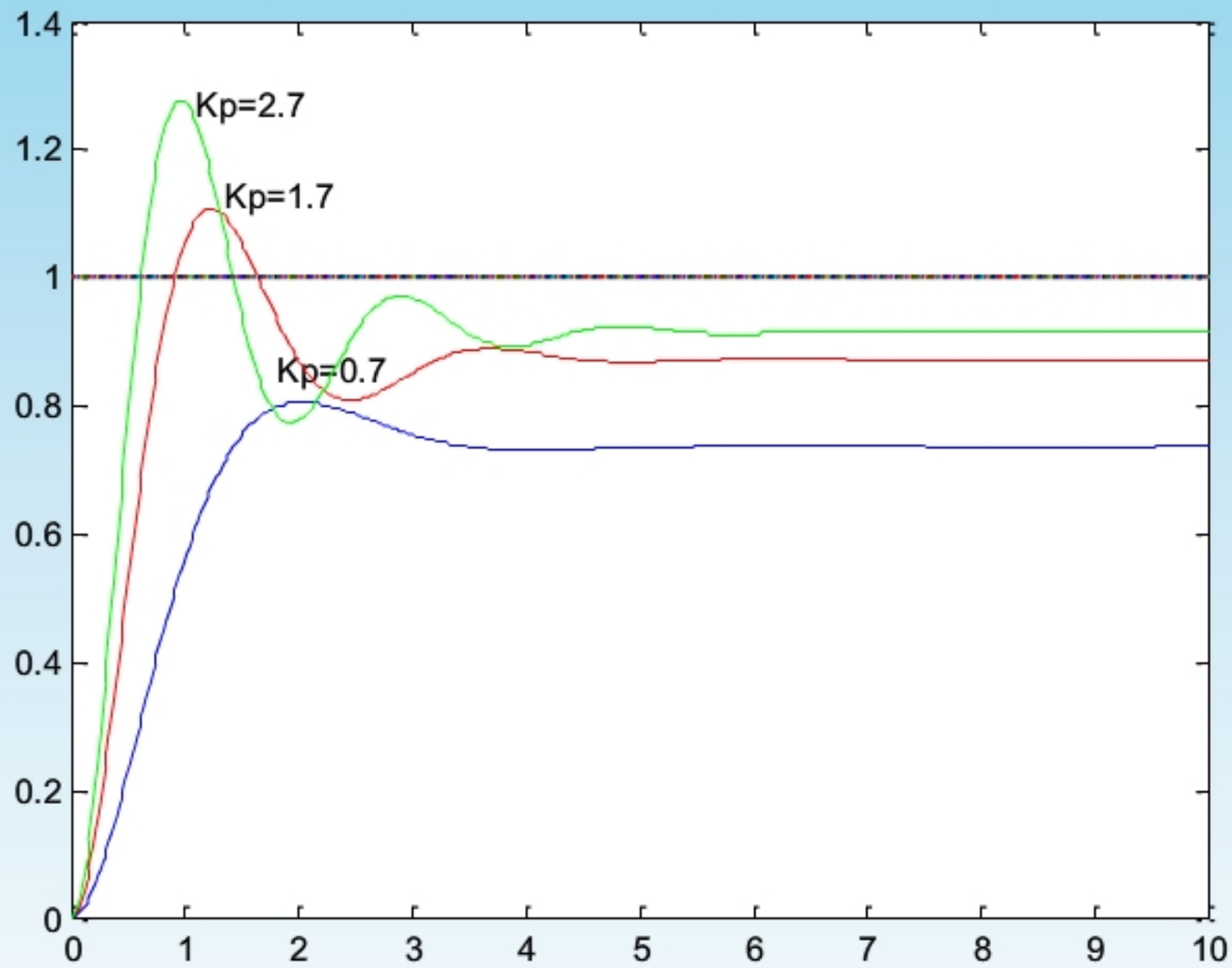
$$G_p(s) = \frac{4}{(2s+1)(0.5s+1)}$$

$$H(s) = \frac{1}{0.05s+1}$$



4 PID调节原理

❖ 纯P作用下系统的阶跃响应

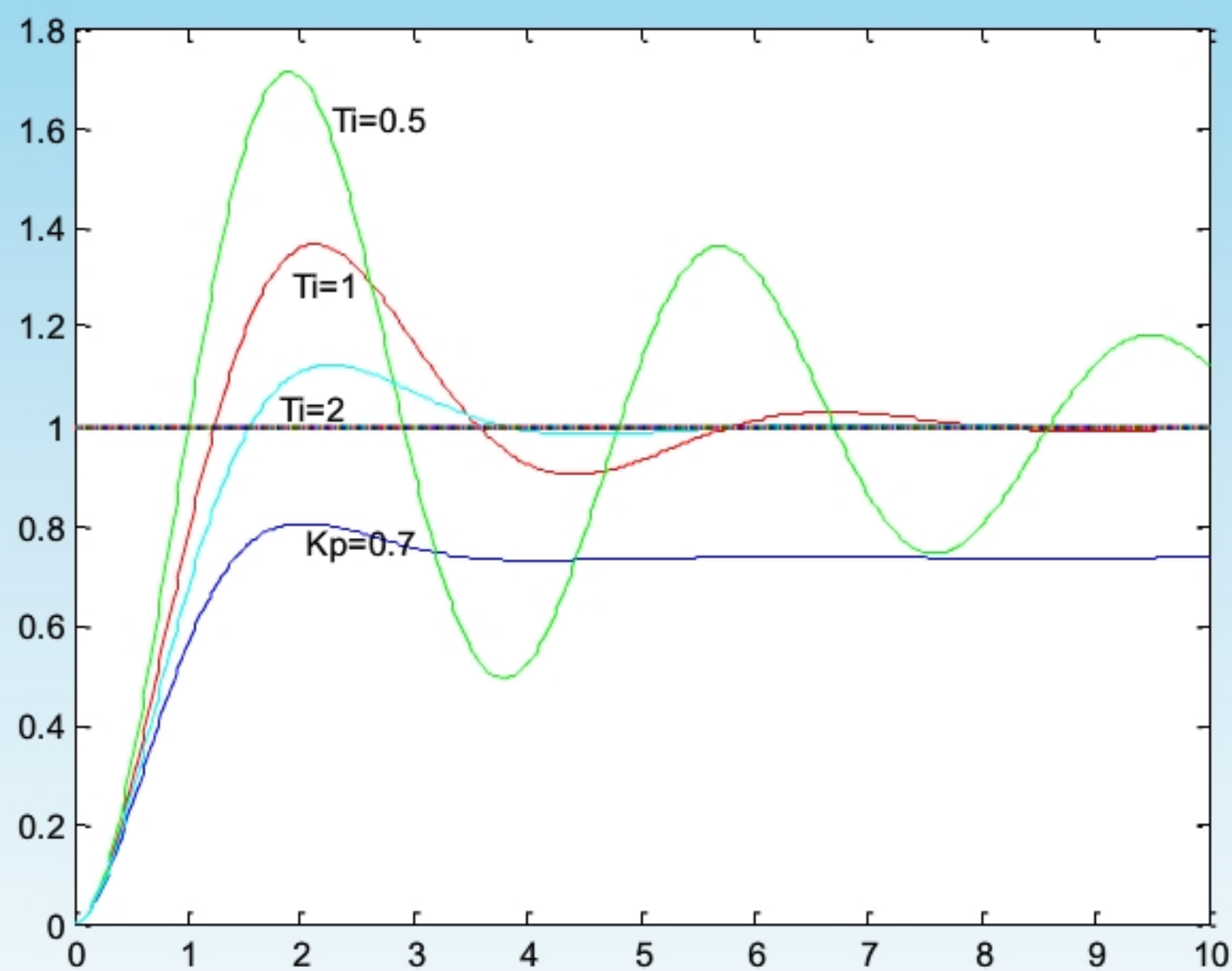


- 纯P调节是有差调节
- K_p 大，稳态误差小，响应快，但超调大



4 PID调节原理

❖PI作用下系统的阶跃响应

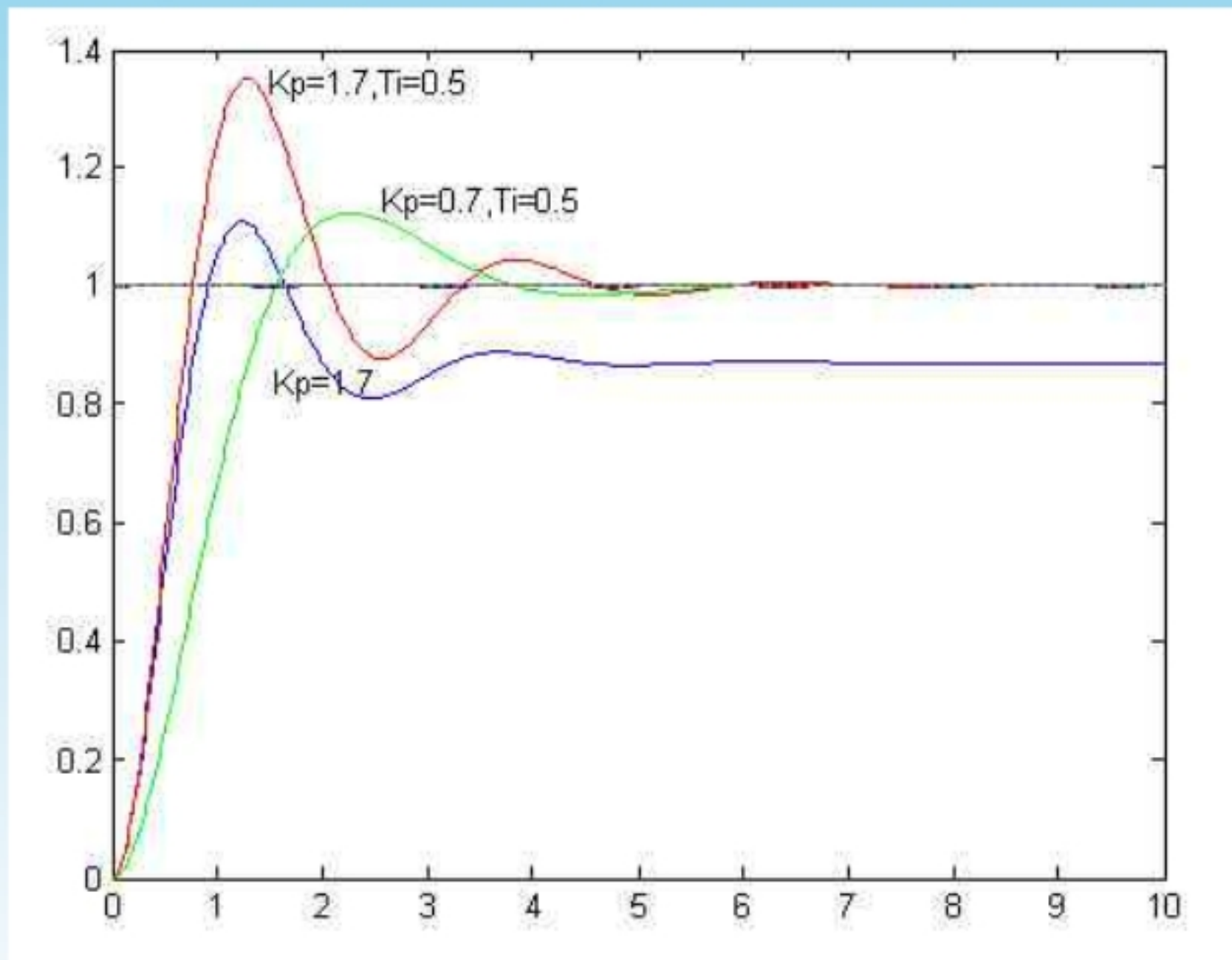


- 引入积分，消除了余差
- T_i 大，响应速度加快，超调大，系统振荡加剧



4 PID调节原理

❖PI作用下系统的阶跃响应

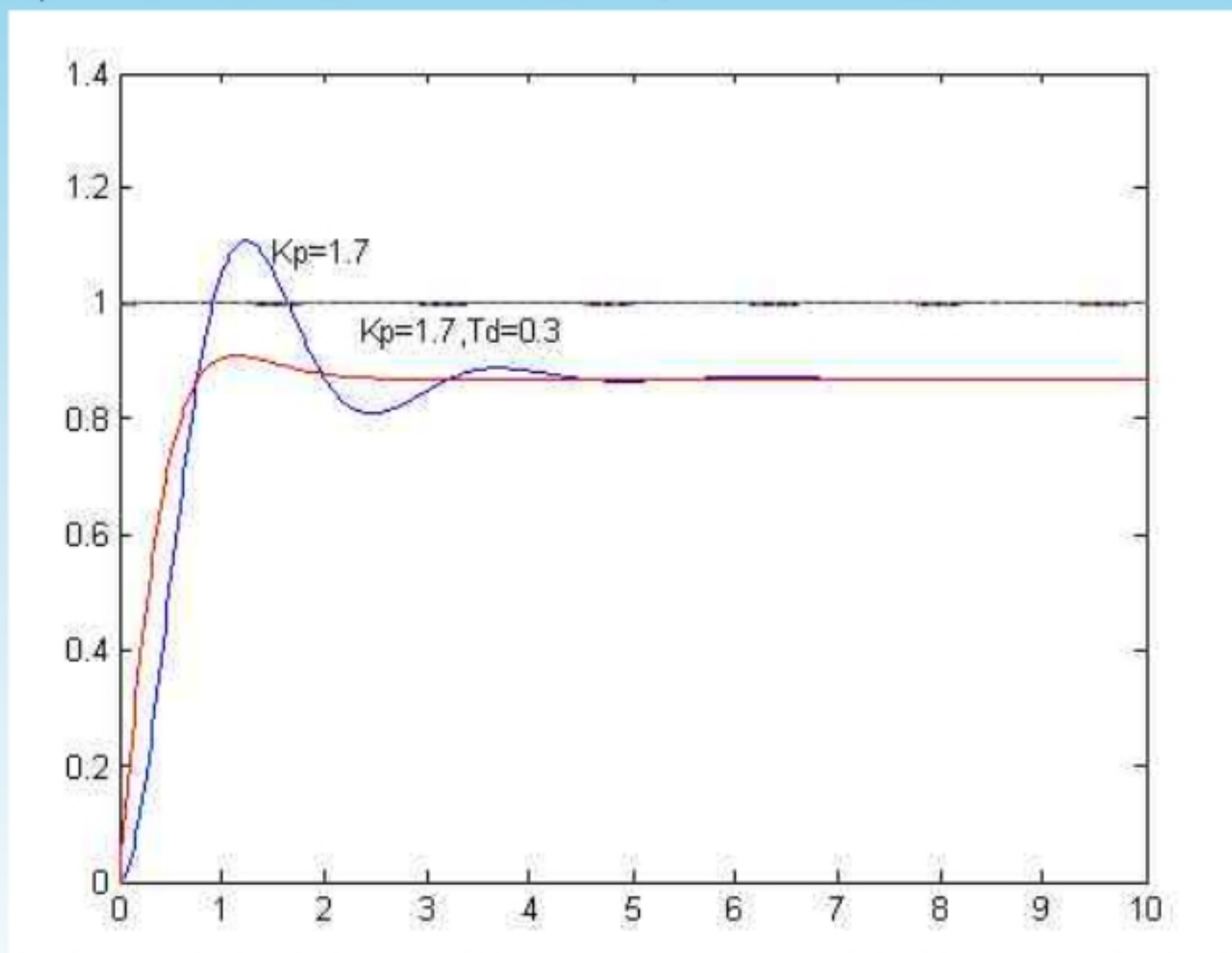


- 在同样积分常数 T_i 下，减小比例增益 K_p 可减小超调，增加系统的稳定性



4 PID调节原理

❖ PD作用下系统的阶跃响应

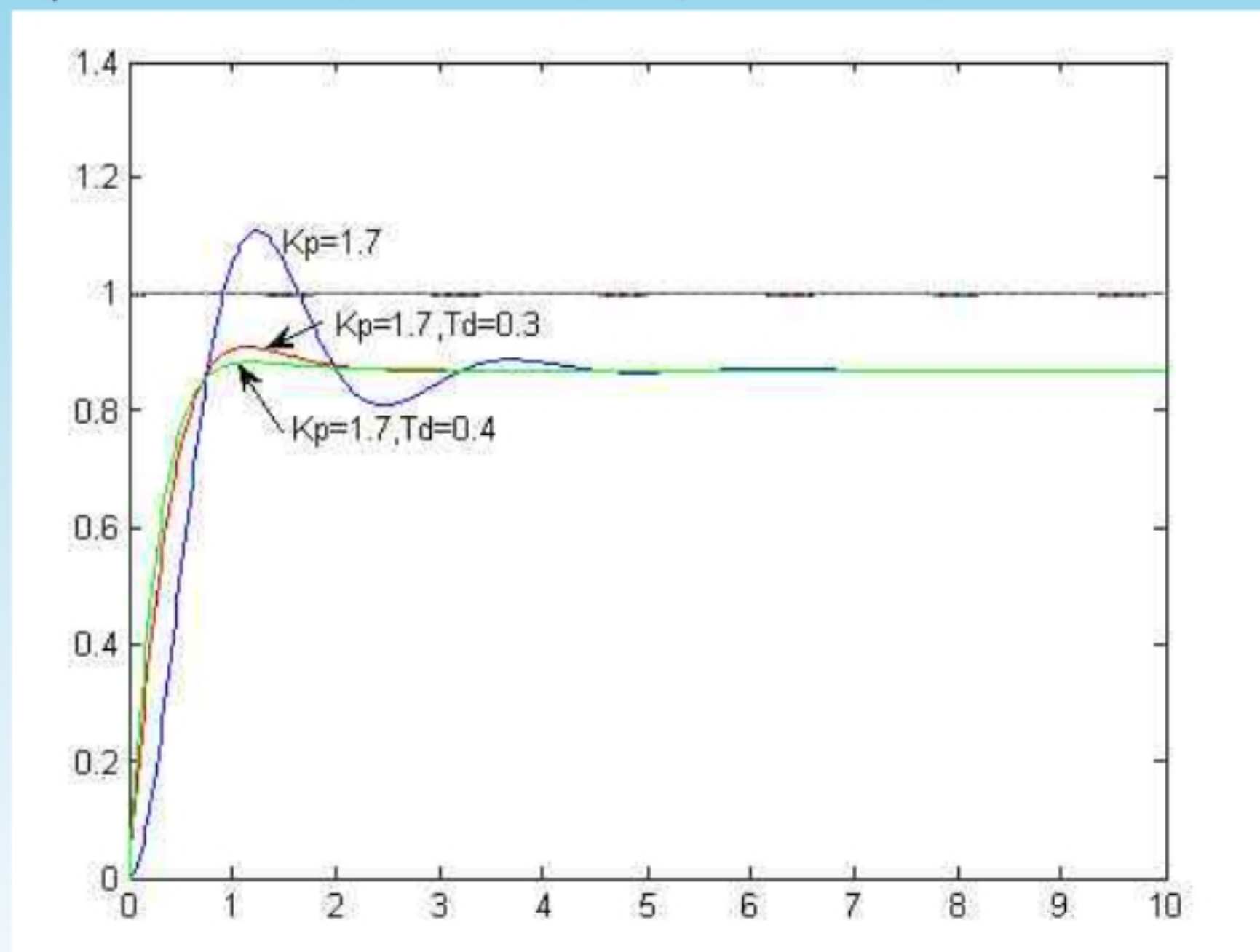


- 引入微分项，提高了响应速度，增加了系统的稳定性但不能消除系统的余差



4 PID调节原理

❖ PD作用下系统的阶跃响应

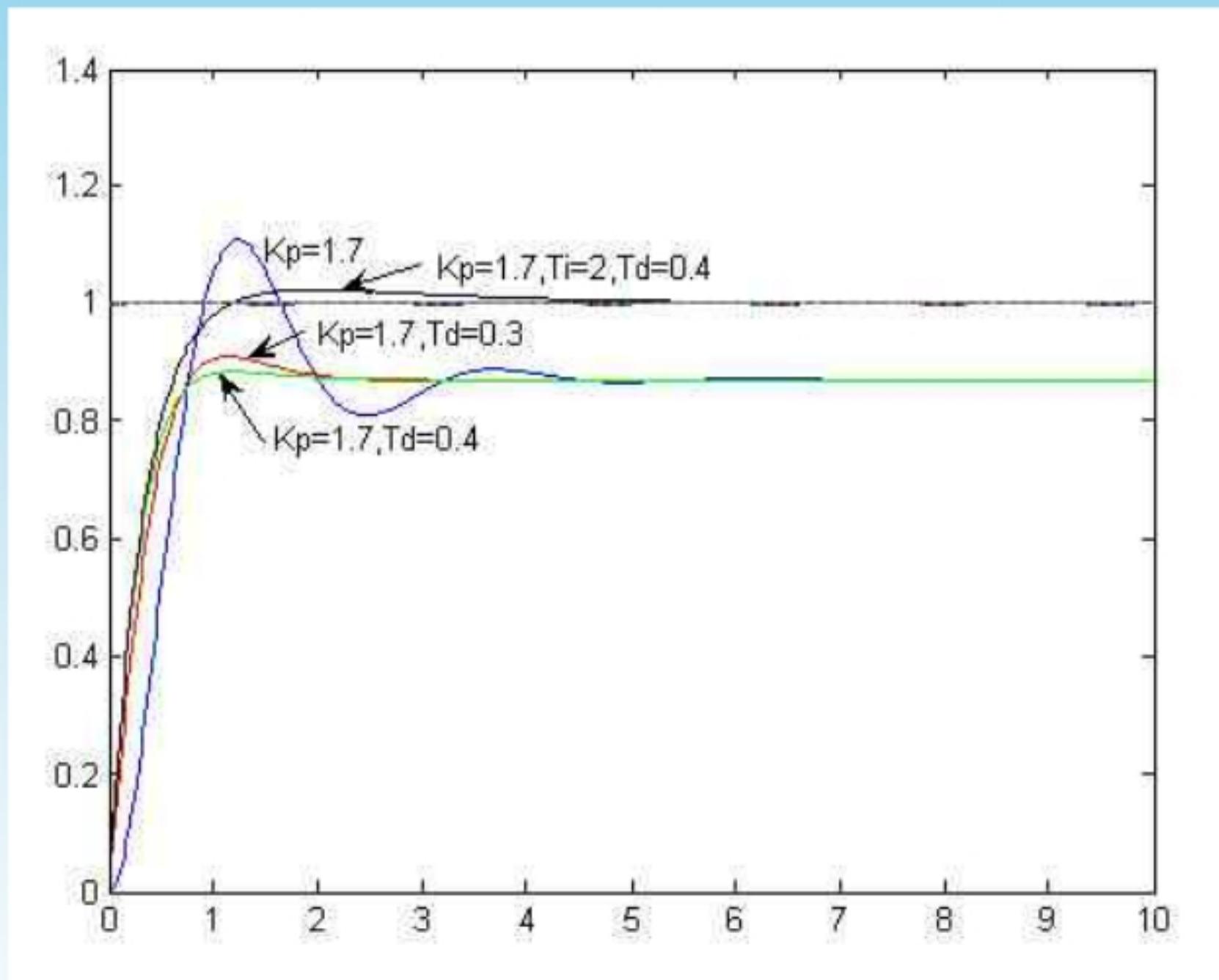


- 微分时间越大，微分作用越强，响应速度越快，系统越稳定



4 PID调节原理

❖PID作用下系统的阶跃响应



- PD基础上I作用的引入消除了余差，达到了理想的多项性能指标要求：超调、上升时间、调节时间、余差等



4 PID调节原理

❖ 调节器动作规律的选择

- 应根据对象特性、负荷变化、主要扰动和系统控制要求、系统的经济性以及系统投入方便等进行选择。
- 如，对象时间常数（迟延）大小、有无余差要求、负荷变化大小等
 - T大，
— 如温度、成分、pH值控制等
 - 无余差，
— 如管道压力和流量的控制
 - T较小，负荷变化较小，工艺要求不高，
— 贮罐压力、液位的控制
 - T大（延迟大）、负荷变化大
—



4 PID调节原理

❖ 如果被控对象传递函数可用

$$G_p(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

则可根据对象的可控比 τ / T 选择调节器的动作规律。

- $\tau / T < 0.2$, 选择比例或比例积分动作;
- $0.2 < \tau / T \leq 1.0$, 选择比例微分或比例积分微分动作;
- $\tau / T > 1.0$, 应选用如串级、前馈等复杂控制系统

4 PID调节原理

4.6 数字PID控制

由气动或液动、电动仪表组成的模拟PID控制器



由计算机实现的数字PID控制器



4 PID调节原理

4.6.1 数字PID控制算法

❖ PID控制算法离散化



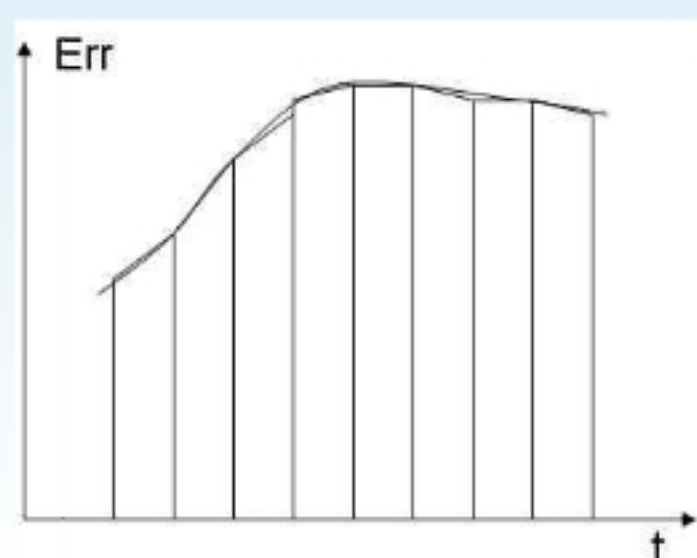
4 PID调节原理

❖ 位置式PID控制算法

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4.26)$$

求和取代积分

差分取代微分



$$u = \frac{1}{\delta} \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (4.22)$$



4 PID调节原理

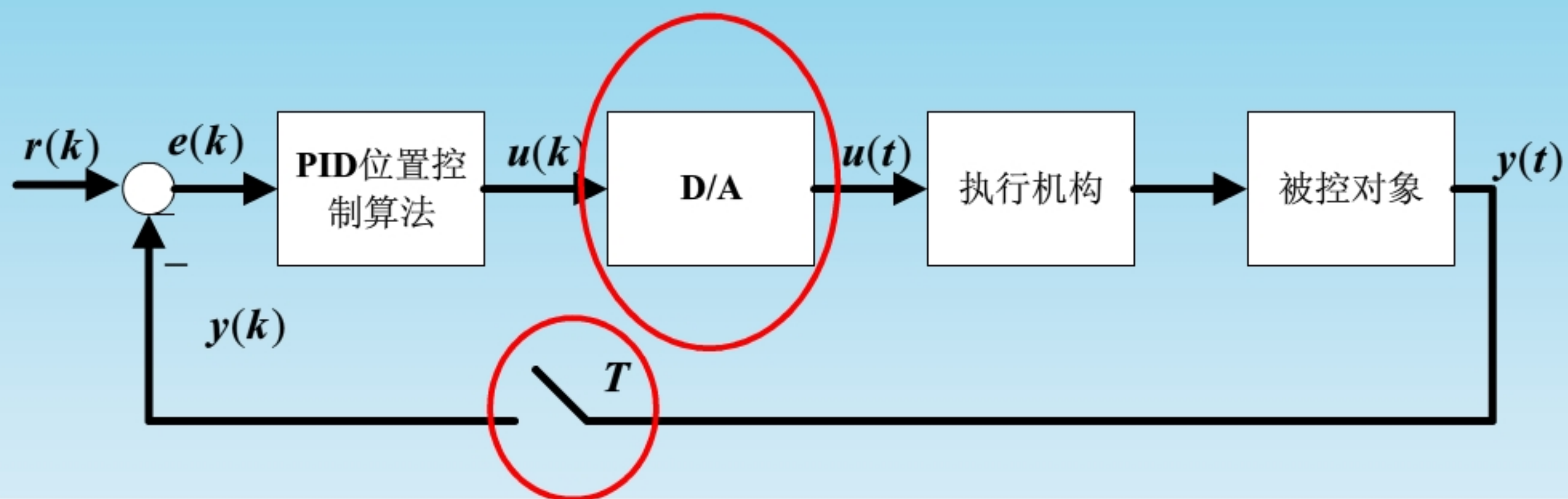


图4.22 位置式PID控制系统



4 PID调节原理

❖ 位置式PID控制算法带来的问题

- 对 $e(k)$ 的累加增大了计算机的存储量和运算的工作量
- $u(k)$ 的直接输出易造成执行机构的大幅度动作
- 有些应用场合要求增量式 $u(k)$



4 PID调节原理

❖ 增量式PID控制

$$u(k) = K_p \{e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\}$$

$$- u(k-1) = K_p \{e(k-1) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)]\}$$

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

K_p 比例增益, $K_I = K_p T / T_I$ 积分系数, $K_D = K_p T_D / T$ 微分常数



4 PID调节原理

为编程方便，增量式PID可采用如下形式

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (4.29)$$

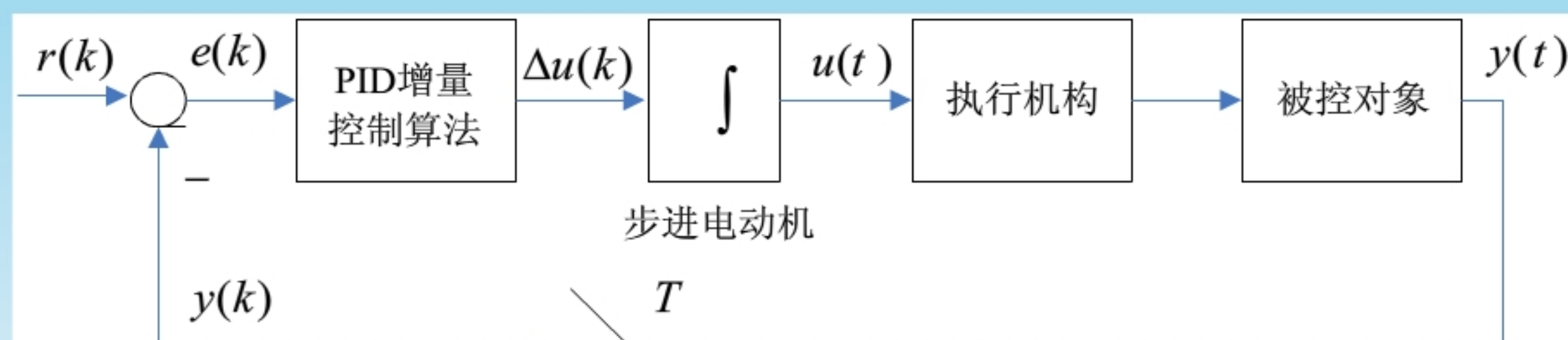
式中

$$\begin{cases} q_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}\right) \\ q_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T}\right) \\ q_2 = K_p \frac{T_D}{T} \end{cases}$$

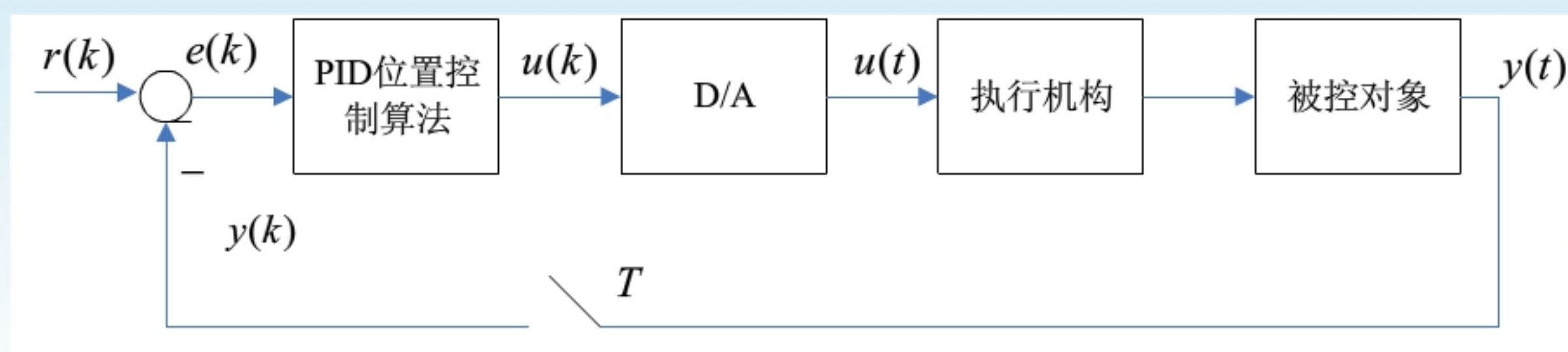


4 PID调节原理

❖ 增量式PID控制系统示意图



❖ 位置式PID控制系统示意图



4 PID调节原理

❖ 增量式PID控制算法的优点

- 不累加误差，增量的确定仅与最近几次偏差采样值有关，计算精度对控制量的计算影响较小；
- 得出的是控制量的增量，误动作影响小；
- 增量型算法不对偏差做累加，因而也不易引起积分饱和；
- 易实现手动到自动的无冲击切换。



4 PID调节原理

4.6.2 改进的数字PID算法

❖ 积分项的改进

- 积分分离PID算法
- 遇限削弱积分PID算法



4 PID调节原理

■ 积分分离PID算法

- 控制偏差较大时，取消积分作用，以减小超调；
控制偏差较小时，再恢复积分作用，以消除余差

$$u(k) = K_p \{e(k) + \beta \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]\} \quad (4.31)$$

式中

$$\beta = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 0 & |e(k)| > \varepsilon \end{cases}$$



4 PID调节原理

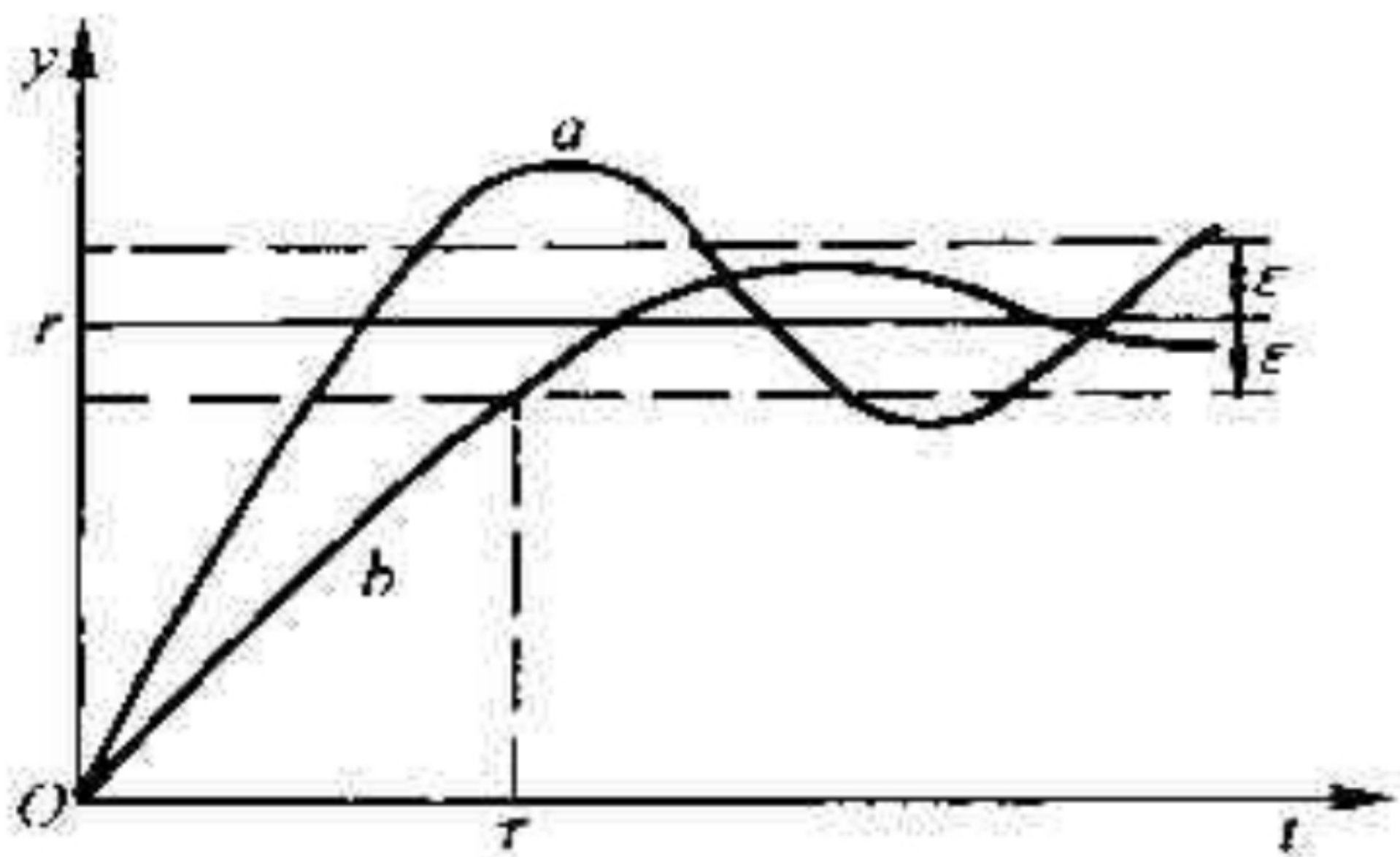


图4.24 有无积分分离的PID控制效果的比较



4 PID调节原理

❖ 遇限削弱积分PID算法

- 若上一时刻控制输出已经达到最大（小），则此次只累加负（正）偏差，以避免控制量长时间停留在饱和区。



4 PID调节原理

❖ 微分项的改进

- 微分作用对高频干扰非常灵敏，容易引起控制过程振荡，降低调节品质。为此有必要对PID算法中的微分项进行改进。

❖ 微分项的改进算法

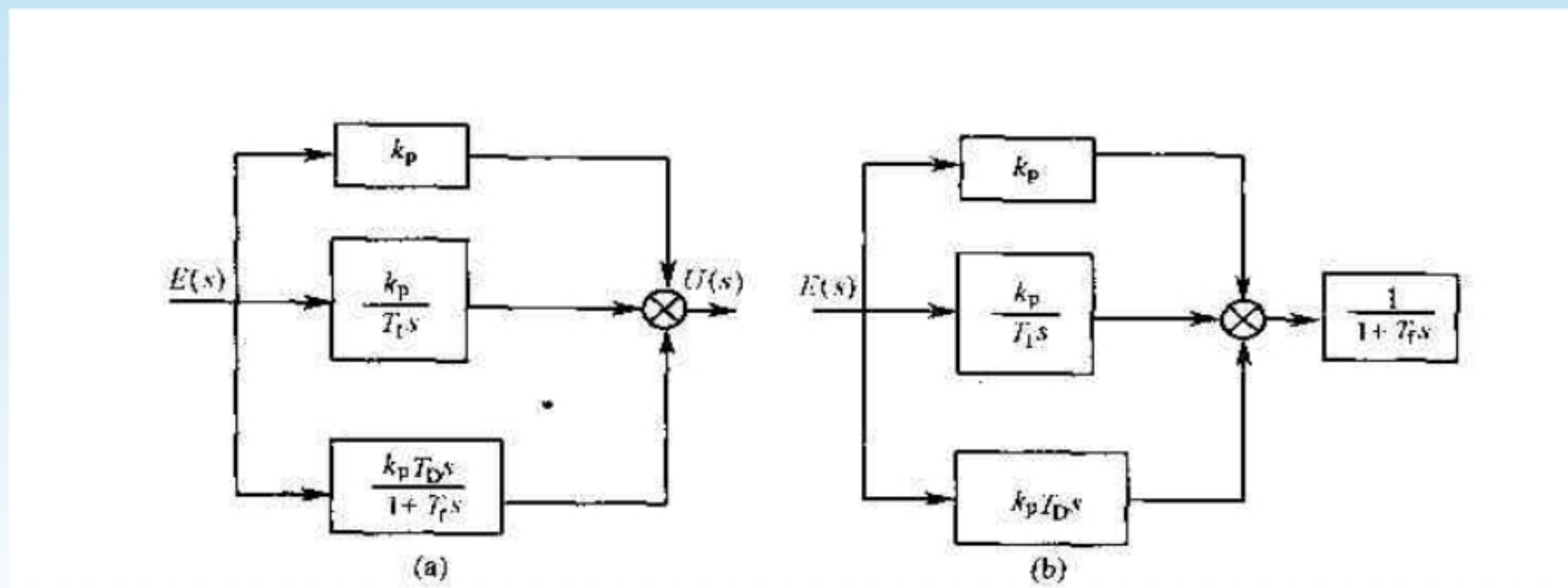
- 不完全微分算法
- 微分先行



4 PID调节原理

❖ 不完全微分算法

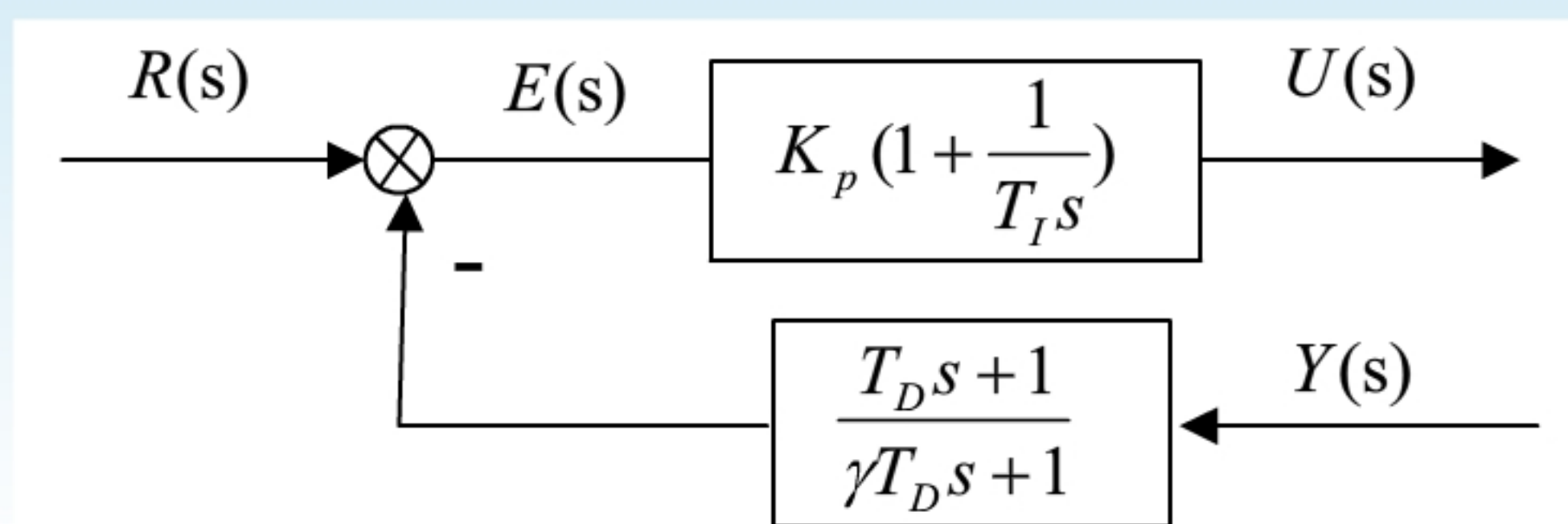
- 在普通PID算法中加入一个一阶惯性环节（低通滤波 $G(s)=1/(1+T_f s)$ ），以获得比较柔和的微分控制。



4 PID调节原理

❖ 微分先行

- 只对测量值 $y(t)$ 微分，而不对偏差 $e(t)$ 微分，也即对给定值 $r(t)$ 无微分作用。
- 这样在调整设定值时，控制器的输出就不会产生剧烈的跳变，也就避免了给定值升降给系统造成的冲击。



4 PID调节原理

4.7 PID调节器的参数工程整定

❖ 调整PID调节器中的三个参数

- 比例参数 K_P (或者是比例带 δ)
- 积分时间常数 T_I
- 微分时间常数 T_D
- 数字PID中的采样周期 T_S



4 PID调节原理

4.7.1 PID参数整定的基本原则

衡量调节器参数是否最佳，需要规定一个明确的统一反映控制系统质量的性能指标。



4 PID调节原理

❖ 单项性能指标

- 衰减率(或衰减比)、最大动态偏差、调节时间(又称回复时间)或振荡周期等

❖ 误差积分性能指标

- 误差积分(IE)、绝对误差积分(IAE)、平方误差积分(ISE)、时间与绝对误差乘积积分(ITAE)等

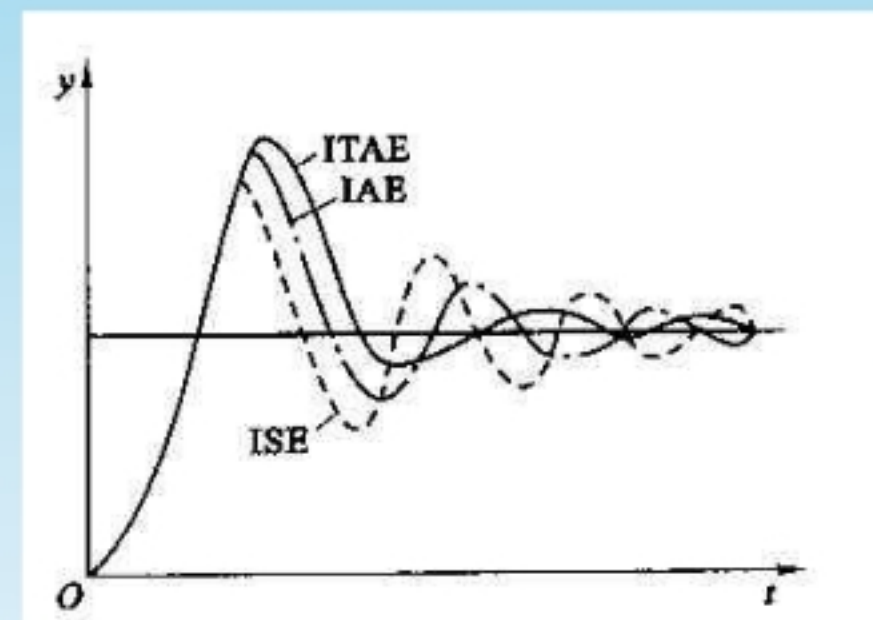
$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt = \min$$



4 PID调节原理

❖ 误差积分性能指标（续）

- ISE ($\int_0^{\infty} e^2 dt$)
 - 最大动态偏差较小，调节时间较长
 - IAE ($\int_0^{\infty} |e| dt$)
 - 介于 ISE 和 ITAE 之间
 - ITAE ($\int_0^{\infty} t |e| dt$)
 - 最大动态偏差最大，调节时间最短
- ∴
- ISE 抑制大偏差
 - IAE 抑制小偏差
 - ITAE 抑制长时间存在的偏差



4 PID调节原理

4.7.2 PID参数的工程整定方法

- ❖ 动态特性参数法
- ❖ 稳定边界法
- ❖ 衰减曲线法

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



4 PID调节原理

4.7.2.1 动态特性参数法

- ❖ 背景：1942年由齐格勒 (Ziegler) 和尼科尔斯 (Nichols) 首先提出。
- ❖ 使用方法的前提是，广义被控对象的阶跃响应可用一阶惯性环节加纯延迟来近似。

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$



4 PID调节原理

❖ 动态特性参数法:

- 若广义被控对象的阶跃响应可用一阶惯性环节加纯延迟来近似

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

- 则做实验得对象参数

$$K, T, \tau$$

- 再根据Z—N调节器参数整定公式求取PID参数:

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



4 PID调节原理

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

表 4.1 Z—N 调节器参数整定公式

控制规律	比例带 δ (%)	积分时间 T_I /min	微分时间 T_D /min
P	$K(\tau/T)$		
PI	$1.1K(\tau/T)$	3.3τ	
PID	$0.85K(\tau/T)$	2.0τ	0.5τ



4 PID调节原理

动态特性参数法的各种改进方法:

- ❖ 以衰减率 $\psi = 0.75$ 为性能指标的柯恩 (Cohen) - 库恩 (Coon) 整定公式
- ❖ 以各种误差积分值为系统性能指标的调节器最佳数整定公式



4 PID调节原理

柯恩(Cohen)-库恩(Coon)整定公式

1) 比例调节器

$$K_p K = (\tau / T)^{-1} + 0.333 \quad (4.34)$$

2) 比例积分调节器

$$\left. \begin{aligned} K_p K &= 0.9(\tau / T)^{-1} + 0.082 \\ T_I / T &= [3.33(\tau / T) + 0.3(\tau / T)^2] / \{1 + 2.2(\tau / T)\} \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

3) 比例积分微分调节器

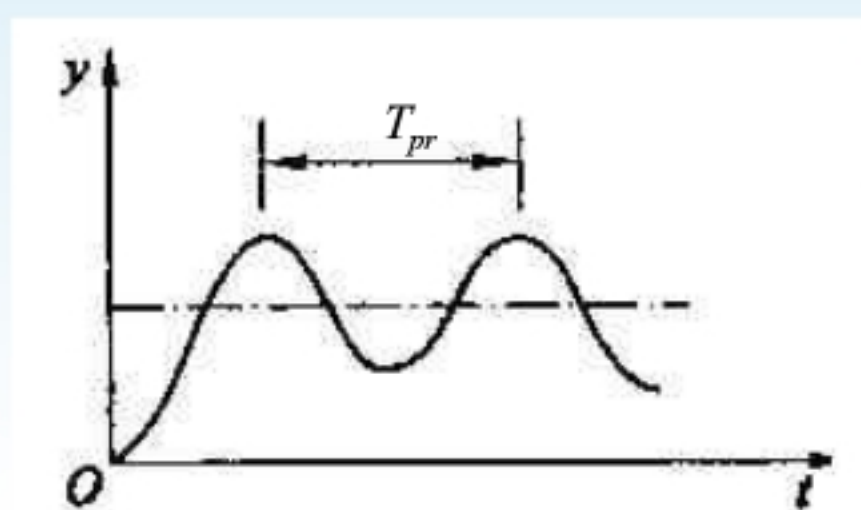
$$\left. \begin{aligned} K_p K &= 1.35(\tau / T)^{-1} + 0.27 \\ T_I / T &= [2.5(\tau / T) + 0.5(\tau / T)^2] / \{1 + 0.6(\tau / T)\} \\ T_D / T &= 0.37(\tau / T) / [1 + 0.2(\tau / T)] \end{aligned} \right\} \quad (4.36)$$



4 PID调节原理

4.7.2.2 稳定边界法

- ❖ 是闭环的整定方法。
- ❖ 基于纯比例控制系统临界振荡试验所得数据，即临界比例带 δ_{pr} 和临界振荡周期 T_{pr} ，利用一些经验公式，求取调节器最佳参数值。
- ❖ 方法操作要点：
 - 纯比例调节下调比例带，使系统出现等幅振荡



4 PID调节原理

表 4.3 稳定边界法参数整定计算公式

调节规律 \ 整定参数	δ (%)	T_I /min	T_D /min
P	$2\delta_{pr}$		
PI	$2.2\delta_{pr}$	$0.85T_{pr}$	
PID	$1.67\delta_{pr}$	$0.50T_{pr}$	$0.125T_{pr}$



4 PID调节原理

注意:

- ❖ 在采用这种方法时，控制系统应工作在线性区，否则得到的持续振荡曲线可能是极限环，不能依据此时的数据来计算整定参数。
- ❖ 由于被控对象特性的不同，按上述经验公式求得的调节器整定参数不一定都能获得满意的结果。为此，在实际应用时，需要针对具体系统，对上述求得的调节器参数作在线校正。



4 PID调节原理

4.7.2.3 衰减曲线法

- ❖ 也是闭环整定方法
- ❖ 整定的依据同稳定边界法，也是纯比例调节下的试验数据，
- ❖ 不同的只是这里的试验数据来自系统的衰减振荡，且衰减比特定（通常为4:1或10:1），
- ❖ 之后就与稳定边界法一样，也是利用一些经验公式，求取调节器相应的整定参数。



4 PID调节原理

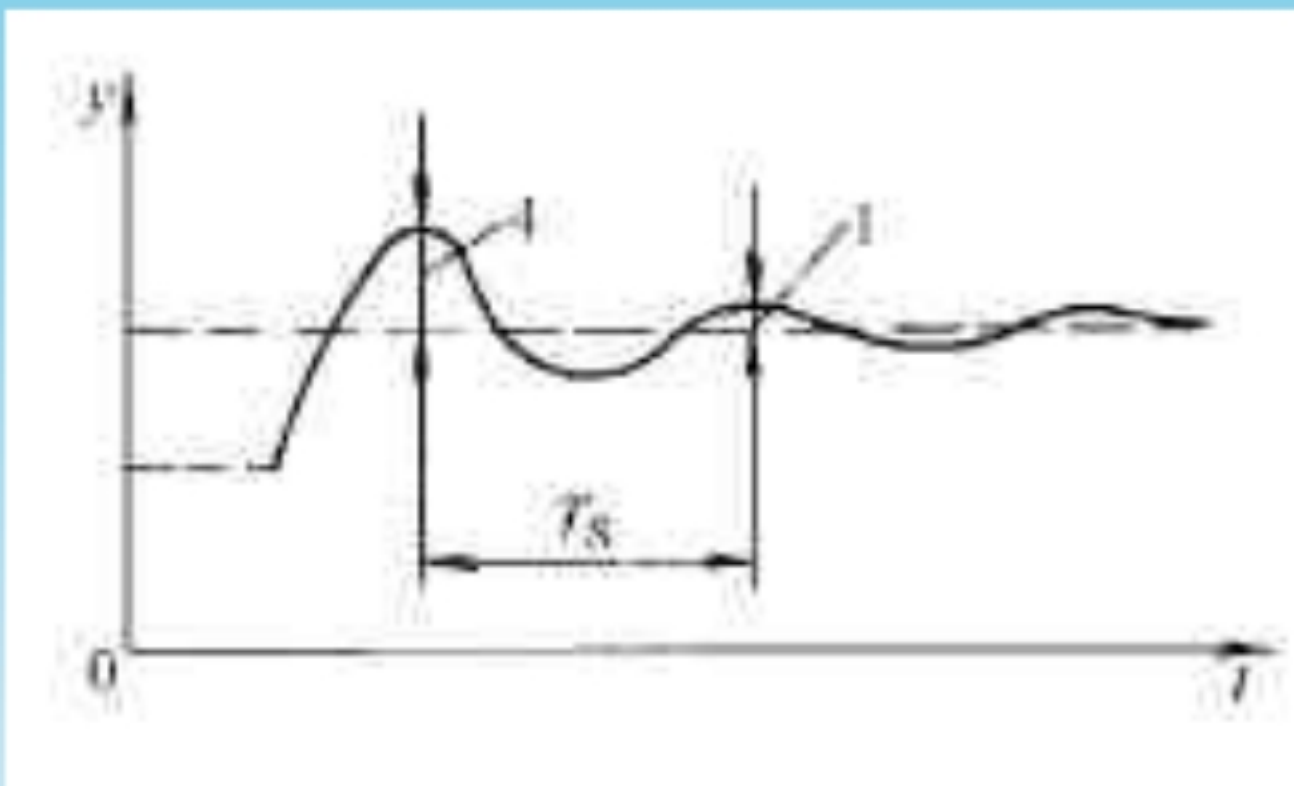


图4.30 4:1衰减振荡曲线

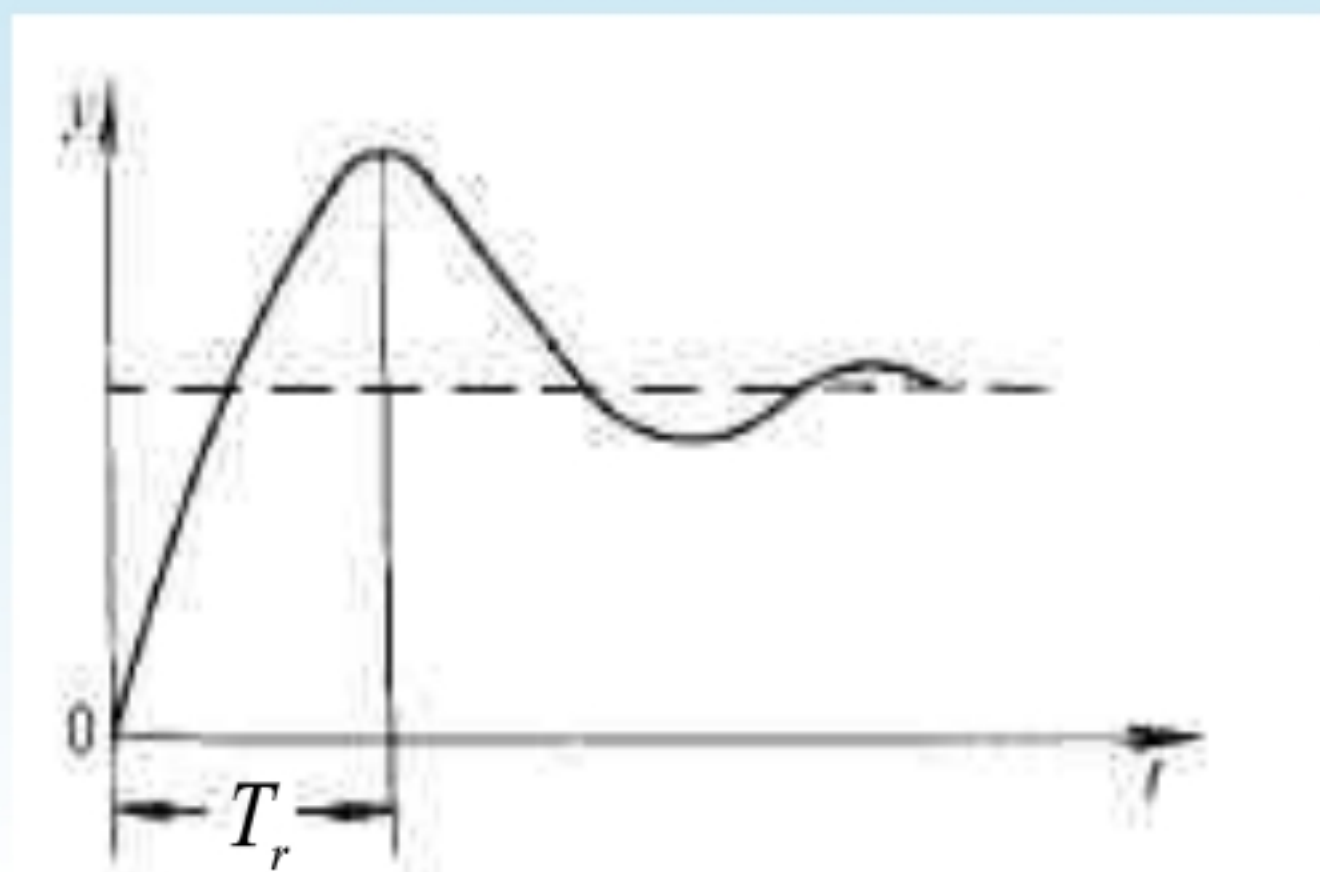


图4.31 10:1衰减振荡曲线

4 PID调节原理

❖ 衰减曲线法的整定公式

表 4.4 衰减曲线法整定计算公式

衰减比	整定参数 调节规律	δ (%)	T_I /min	T_D /min
4:1	P	δ_s		
	PI	$1.2\delta_s$	$0.5T_s$	
	PID	$0.8\delta_s$	$0.3T_s$	$0.1T_s$
10:1	P	δ'_s		
	PI	$1.2\delta'_s$	$2T_r$	
	PID	$0.8\delta'_s$	$1.2T_r$	$0.4T_r$



4 PID调节原理

经验整定法（经验试凑法）

- ❖ 根据经验先选一组控制器参数
- ❖ 将系统投入运行
- ❖ 根据运行情况依经验调整PID参数



4 PID调节原理

表 4.5 经验法调节器参数经验数据

被控对象 \ 整定参数	$\delta \times 100$	$T_I \times 100$	$T_D \times 100$
温度	20~60	3~10	0.5~3
压力	30~70	0.4~3	
流量	40~100	0.1~1	
液位	20~80		

表 4.6 设定值扰动下整定参数对调节过程的影响

性能指标 \ 整定参数	$\delta \downarrow$ Kp↑	$T_I \downarrow$ 积分↑	$T_D \uparrow$ 微分↑
最大动态偏差	↑	↑	↓
余差	↓	—	—
衰减率	↓	↓	↑
振荡频率	↑	↑	↑



4 PID调节原理

❖ 例4.1 用动态特性参数法和稳定边界法整定调节器。

- 已知被控对象为二阶惯性环节

$$G(s) = \frac{1}{(5s+1)(2s+1)}$$

- 测量装置和调节阀的特性为

$$G_m(s) = \frac{1}{10s+1}, G_v(s) = 1.0$$

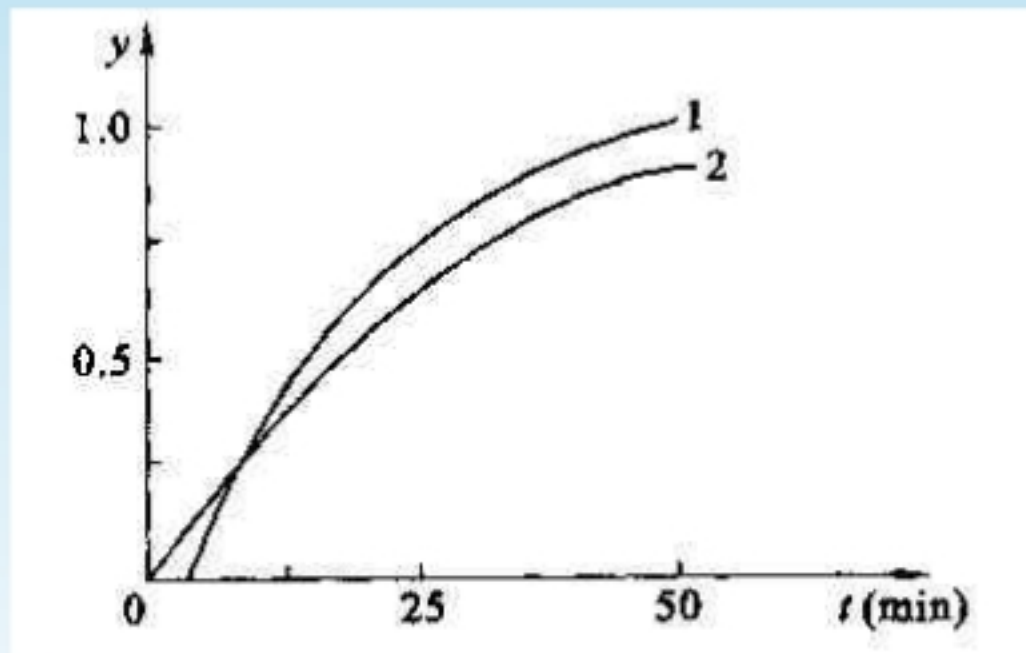


4 PID调节原理

- 广义对象的传递函数为

$$G_p(s) = G_v(s)G(s)G_m(s) = \frac{1}{(5s+1)(2s+1)(10s+1)}$$

- 其阶跃响应曲线（曲线1）



- 可近似为带纯延迟的一阶环节特性（曲线2）

$$G_p(s) = \frac{1}{20s+1} e^{-2.5s}$$



4 PID调节原理

❖ 利用柯恩—库恩参数整定公式，求得

调节器 _φ	K_p _φ	T_I _φ	T_D _φ
P _φ	8.3 _φ	_φ	_φ
PI _φ	7.3 _φ	6.6 _φ	_φ
PID _φ	10.9 _φ	5.85 _φ	0.89 _φ

❖ 用稳定边界法整定的调节器参数为

调节器 _φ	K_p _φ	T_I _φ	T_D _φ
P _φ	6.3 _φ	_φ	_φ
PI _φ	5.7 _φ	12.62 _φ	_φ
PID _φ	7.4 _φ	7.57 _φ	1.89 _φ

比较：1) 柯恩—库恩整定公式求得的比例增益稍大。



4 PID调节原理

4.7.3 PID参数的自整定方法

❖ 离线整定和在线整定

❖ 自适应PID参数整定的基本思路

- 首先设法辨识出过程的特性，然后按某种规律对控制参数进行整定

❖ 继电器型自整定法

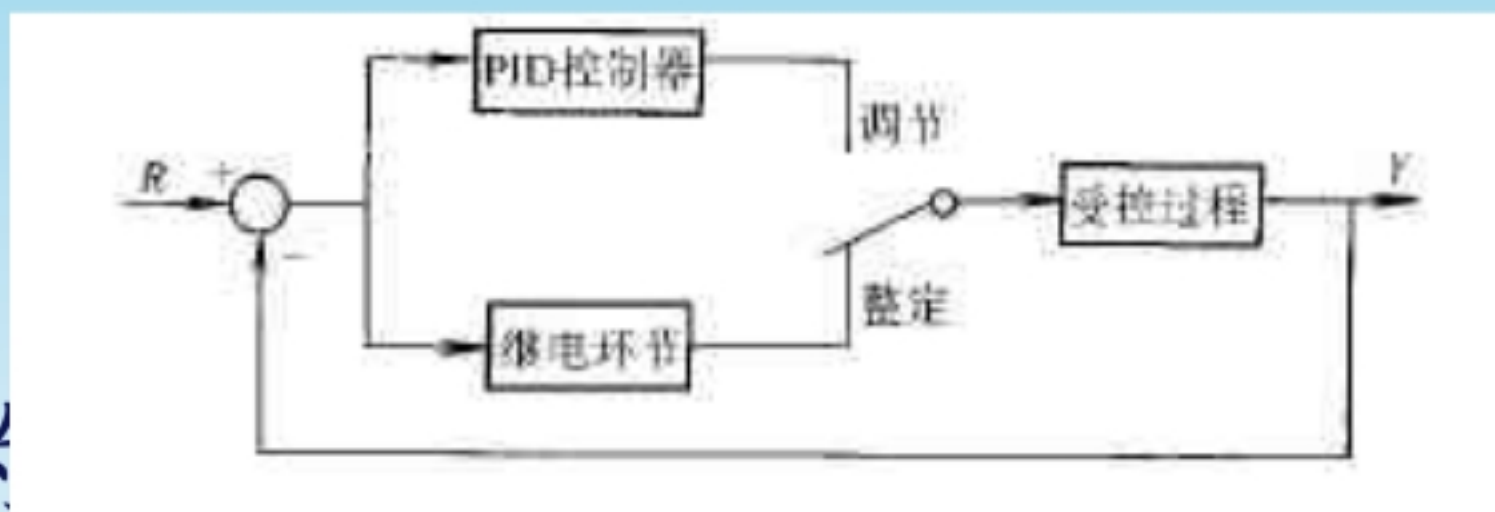
- 测试模式
 - 利用继电环节的时滞特性产生闭环等幅振荡，再利用稳定边界法计算出整定的**PID**参数
- 控制模式
 - 利用整定后的参数对系统进行调节



4 PID调节原理

继电器型自整定法

❖ 继电器型PID参数自整定控制结构（图4.35）



❖ 继电器的

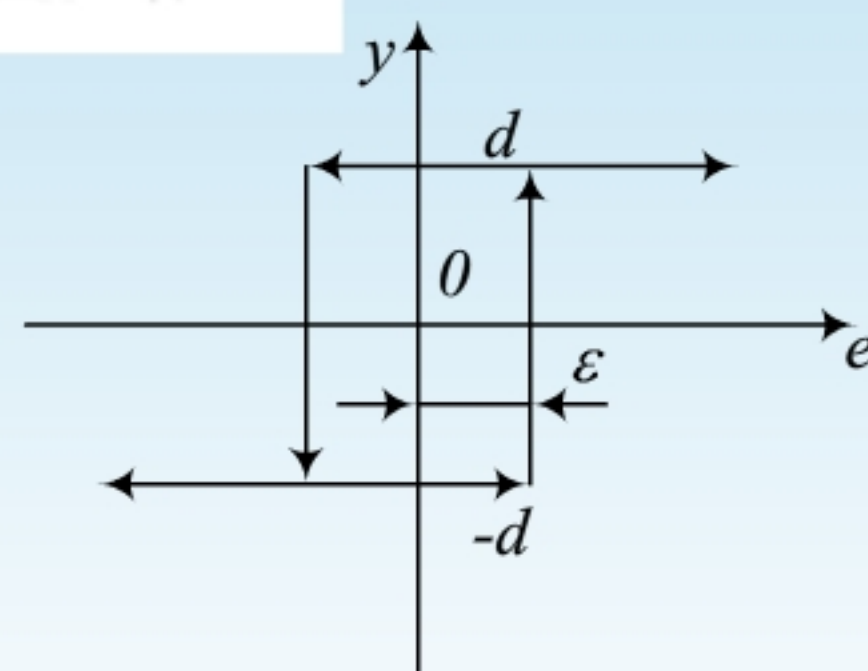
❖ 临界比例带的确定

$$\delta_{pr}$$

$$\delta_{pr} = \frac{\pi A}{4d}$$

A——系统等幅振荡的幅值

d——继电滞环的幅值



4 PID调节原理

4.7.4 数字PID参数的整定

- ❖ 与模拟PID控制器相比，数字PID控制器参数的整定还包括采样周期 T 的确定
 - 采样周期 T 太大 违反香农定理
 - 采样周期 T 太小 计算负担重，微分积分作用不明显
- ❖ 实际确定 T 时应考虑的因素：
 - 给定值的变化频率
 - 被控对象的特性
 - 执行机构的类型
 - 控制的回路数 $T \geq \sum_{j=1}^n T_j$
- ❖ 常用被调量采样周期的经验取值



4 PID调节原理

常用被调量采样周期的经验取值

被调量	采样周期T (s)	备注
流量	1~5	优先选用1~2s
压力	3~10	优先选用6~8s
液位	6~8	
温度	15~20	取纯滞后时间常数
成分	15~20	



4 PID调节原理

- ❖ 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



4.8 智能PID控制方法

❖ 智能PID控制的提出

- 脱离系统数学模型
- 在线调整

❖ 智能控制和PID的结合

- 智能控制具有自学习、自适应、自组织的能力，能够自动辨识被控过程参数、自动整定控制参数、能够适应被控过程参数的变化
- PID控制结构简单、鲁棒性强、可靠性高、为现场工程设计人员所熟悉

❖ 几种智能PID控制

- 模糊PID控制、神经网络PID 控制和专家PID 控制



4.8.1 模糊PID控制

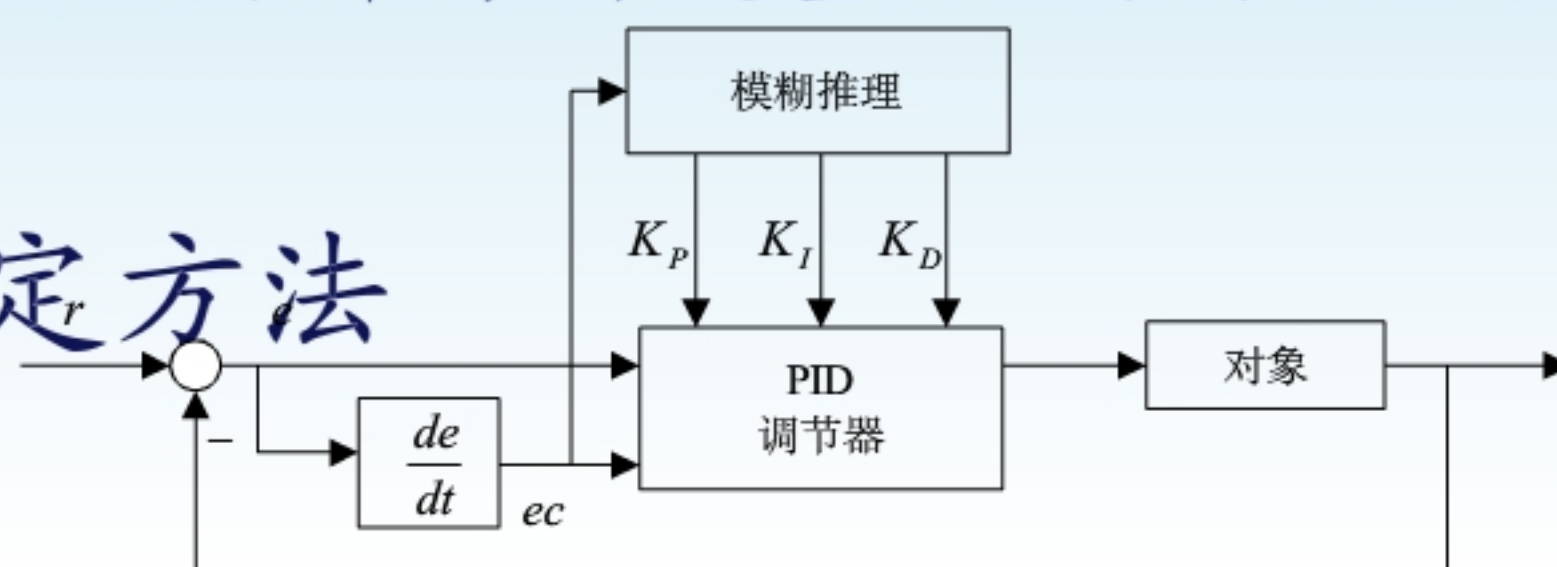
❖ 初衷：利用现场操作人员的调整经验

❖ 调整经验的模糊性

❖ 模糊PID控制的基本方法

- 从现场采集的传感器数据经模糊化成为这些模糊规则的条件，根据条件运用模糊规则进行模糊推理，得到的是模糊决策，将模糊决策去模糊化，就得到实际控制所需的定量控制输出或控制参数了

❖ 模糊PID参数自整定方法

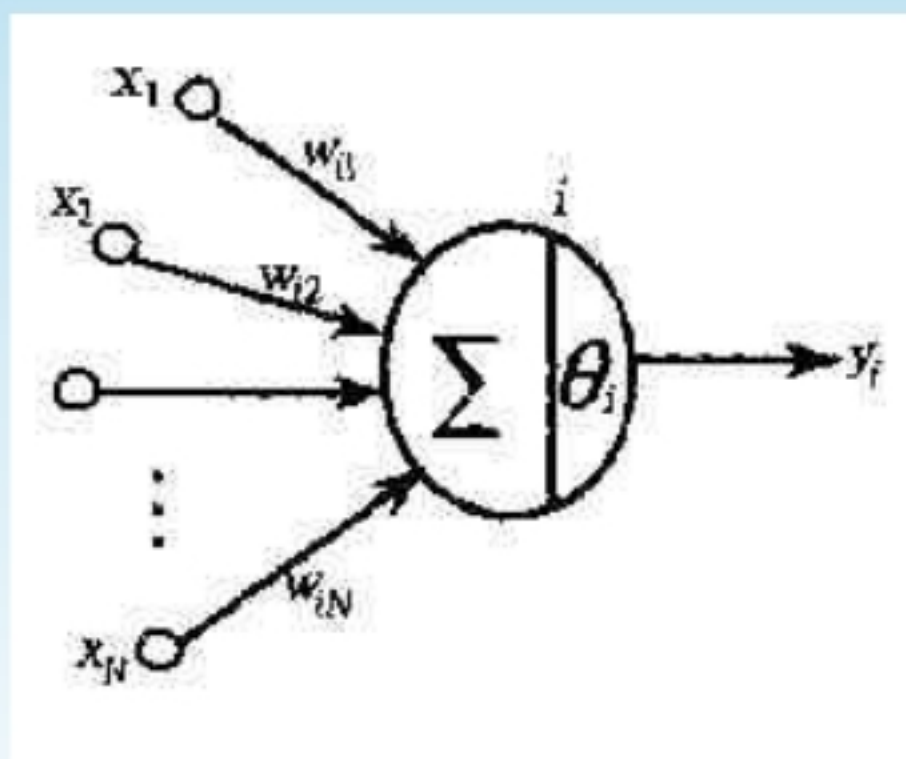


4.8.2 神经网络PID控制

❖ 神经网络简述

- 由计算神经元连接成的网络
- 具有学习能力、记忆能力、计算能力

❖ 神经元

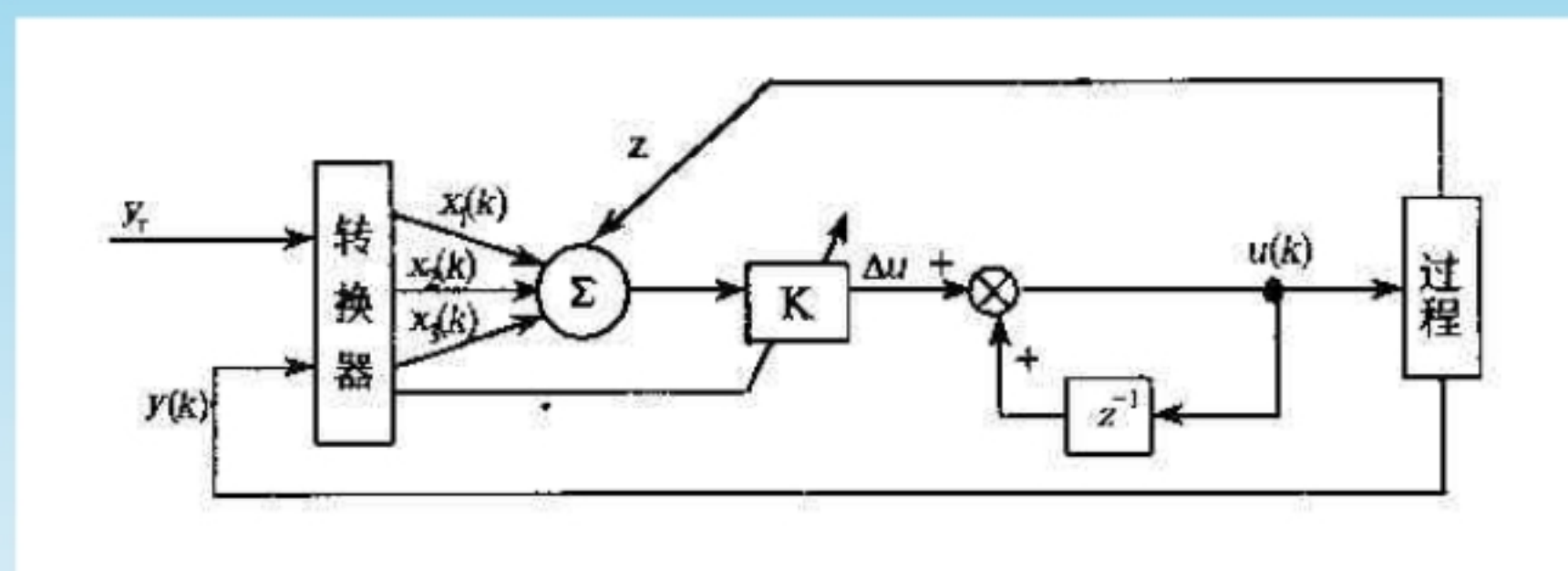


$$y_i = g\left(\sum_{j=1}^N w_{ij} x_j - \theta_i\right)$$



神经网络与PID控制的结合

❖ 利用单神经元实现PID控制



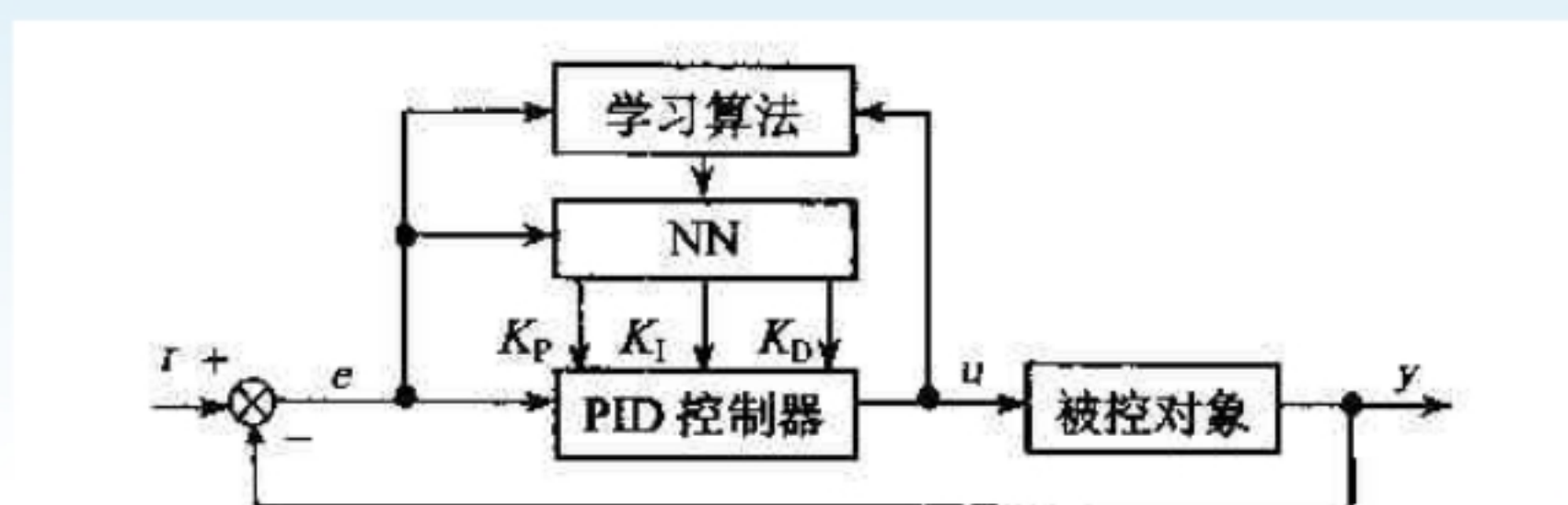
$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k)$$

$$x_1 = y_r - y(k)$$

$$x_2 = e(k) - e(k-1)$$

$$x_3 = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

❖ 利用神经网络实现PID参数的自整定



4.8.3 专家智能自整定PID控制

❖ 用专家经验来整定PID参数

❖ 构建一个专家系统需要两个要素：

- 1) 知识库——存储有某个专门领域中经过事先总结的按某种格式表示的专家水平的知识条目。
- 2) 推理机制——按照类似专家水平的问题求解方法，调用知识库中的条目进行推理、判断和决策。

❖ 典型的专家智能自整定PID控制系统

