



南開大學
Nankai University

《过程控制系统》

第5章 简单控制系统

于宁波

南开大学人工智能学院

简单控制系统

➤ 所谓简单控制系统，通常是指仅由

- 一个被控过程（或称被控对象）、
- 一个测量变送装置、
- 一个控制器（或称调节器）和
- 一个执行器（如调节阀）

所组成的单闭环负反馈控制系统，也称为单回路控制系统。

➤ 简单控制系统是最基本的，约占目前工业控制系统的80%以上。即使是复杂控制系统也是在简单控制系统的基础上发展起来的。至于高等过程控制系统，往往把它作为最低层的控制系统，例如流量跟随系统等。因此，学习和掌握简单控制系统是非常重要的。

第5章 简单控制系统

➤ 5.1 简单控制系统的分析

➤ 5.2 简单控制系统的设计

➤ 5.3 简单控制系统的参数整定

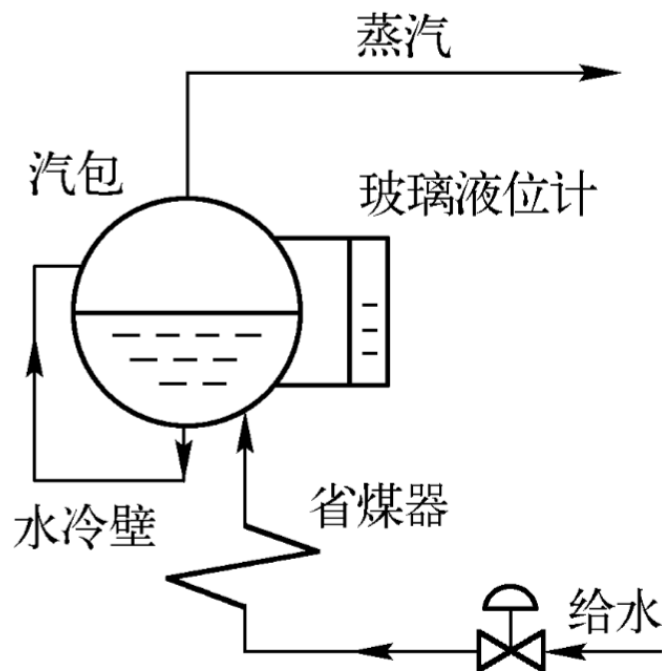
➤ 5.4 简单控制系统的投运

➤ 5.5 简单控制系统的故障与处理

➤ 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

锅炉汽包控制系统的工作过程

- 锅炉是生产蒸汽的设备，是工业生产中不可缺少的设备。工业生产中常见的**锅炉汽包流程图**，如图所示。
- **保持锅炉汽包内的液（水）位高度在规定范围内**是非常重要的，
 - 若水位过低，则会影响产汽量，且锅炉易烧干而发生事故；
 - 若水位过高，生产的蒸汽含水量高，会影响蒸汽质量；
- 这些都是危险的。因此，锅炉汽包液位是一个重要的工艺参数。

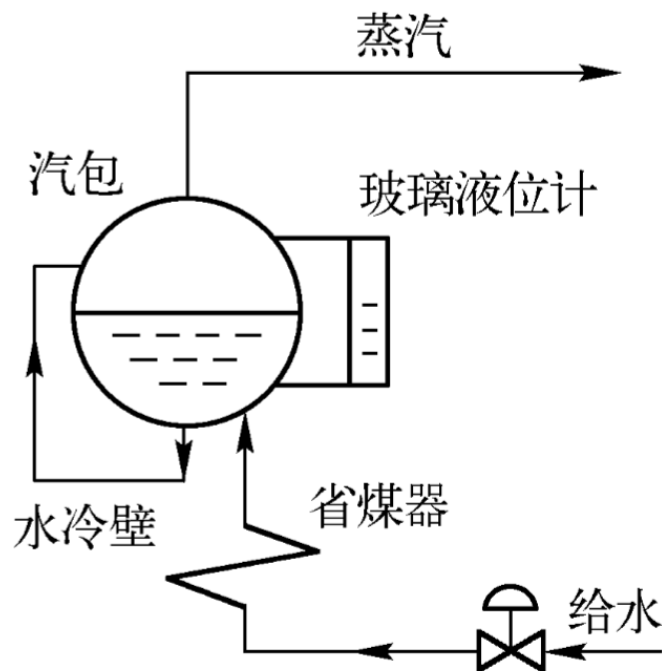


锅炉汽包控制系统的手动控制

➤ **手动控制**保持液位为定值主要有三步：

- 1) **观察被控变量的数值**，即汽包的液位；
- 2) 把观察到的被控变量的值与设定值加以比较，根据两者的偏差大小或者随时间变化的情况，**做出判断并发布命令**；
- 3) 根据命令**操作给水阀**，改变进水量，**使液位回到设定值**。

➤ 如对锅炉汽包液位进行精确控制，就必须采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制，这些自动控制装置和被控的工艺对象就组成了一个简单的**过程控制系统**。

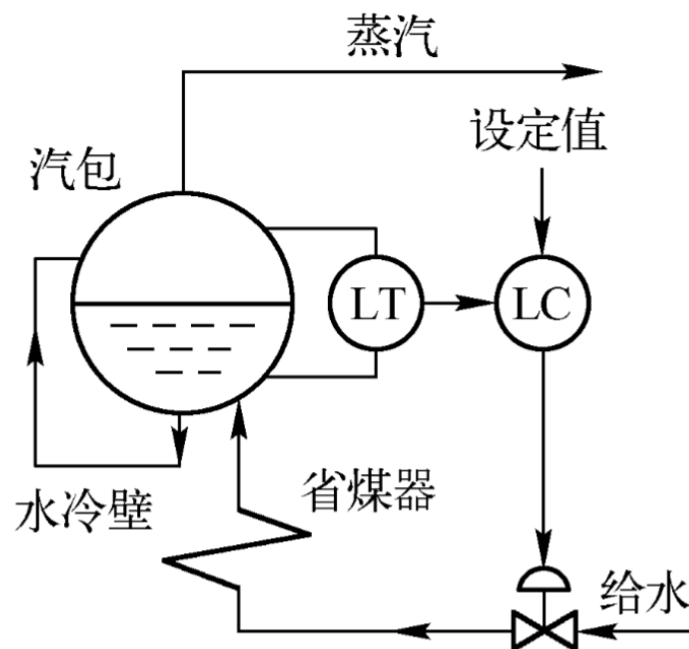


锅炉汽包控制系统的自动控制

➤ 如图为锅炉汽包液位过程控制系统：

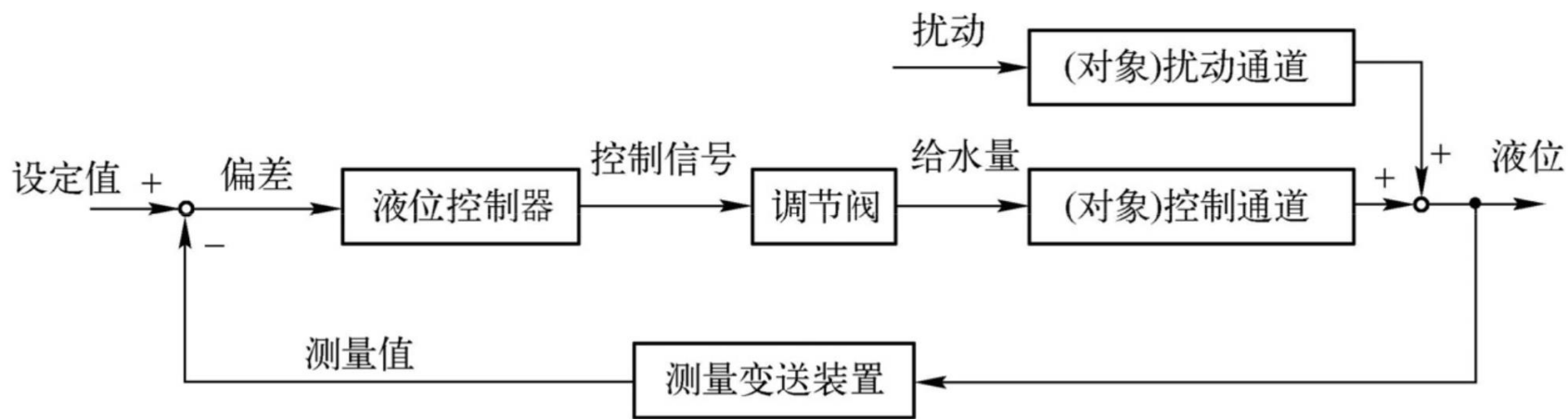
- 当该系统受到扰动作用后，**被控变量**（液位）发生变化，通过**液位测量变送仪表LT**得到其测量值，并且将其传送到**液位控制器LC**；
- 在**LC**中，将被控变量的测量值与设定值比较得到偏差，**控制器LC**对此偏差经过一定的运算后，**输出控制信号**；
- 这一控制信号作用于**执行器**（在此处为调节阀），**改变给水量**，以克服扰动的影响，**使被控变量回到设定值**，

这样就完成了所要求的控制任务。



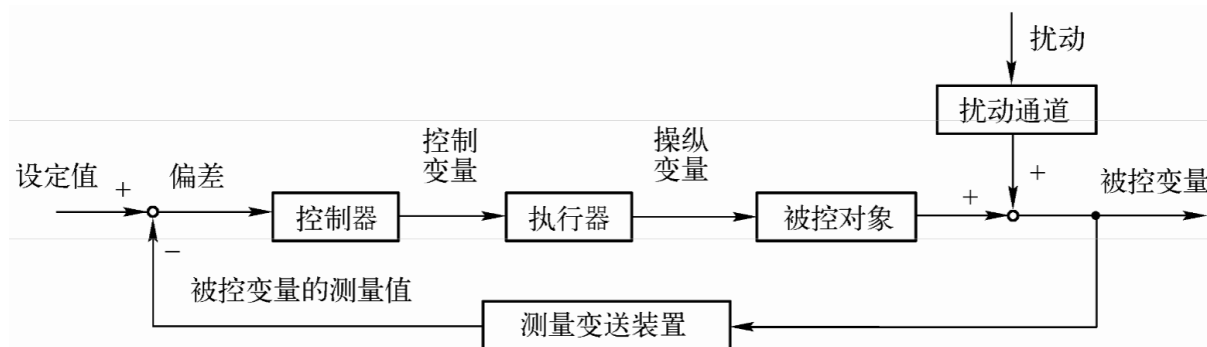
锅炉汽包控制系统的工作过程：负反馈原理

- 过程控制系统的工作过程就是应用**负反馈原理**的控制过程。
- 将锅炉汽包液位控制系统用方框图表示，可得锅炉汽包液位控制系统的**原理结构图**，如图所示

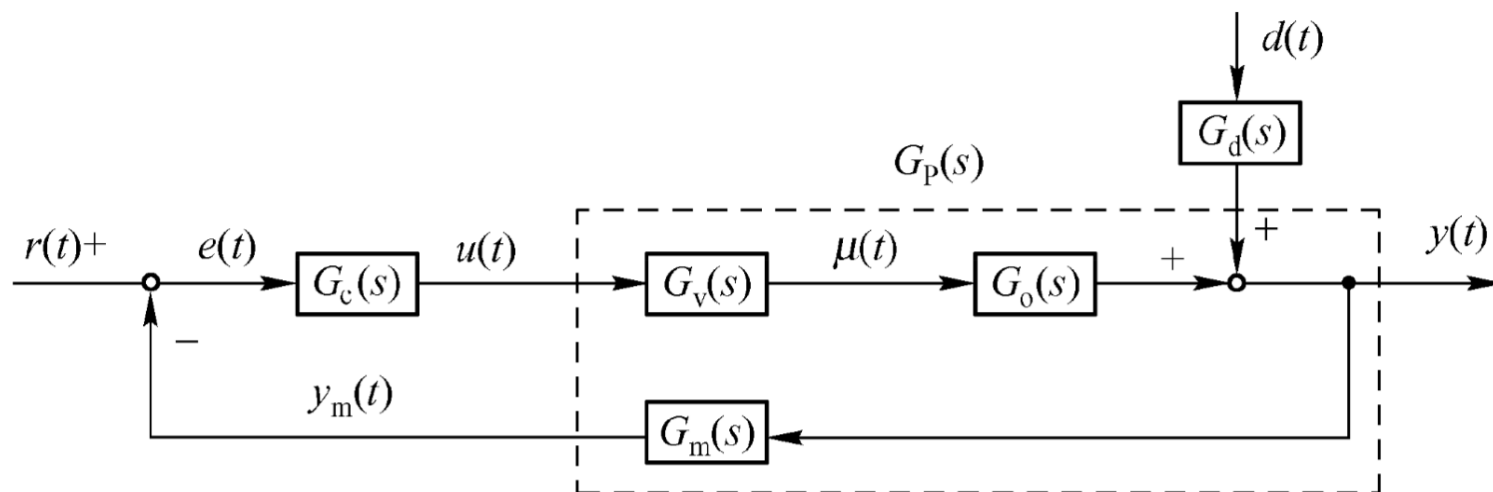


简单控制系统的组成

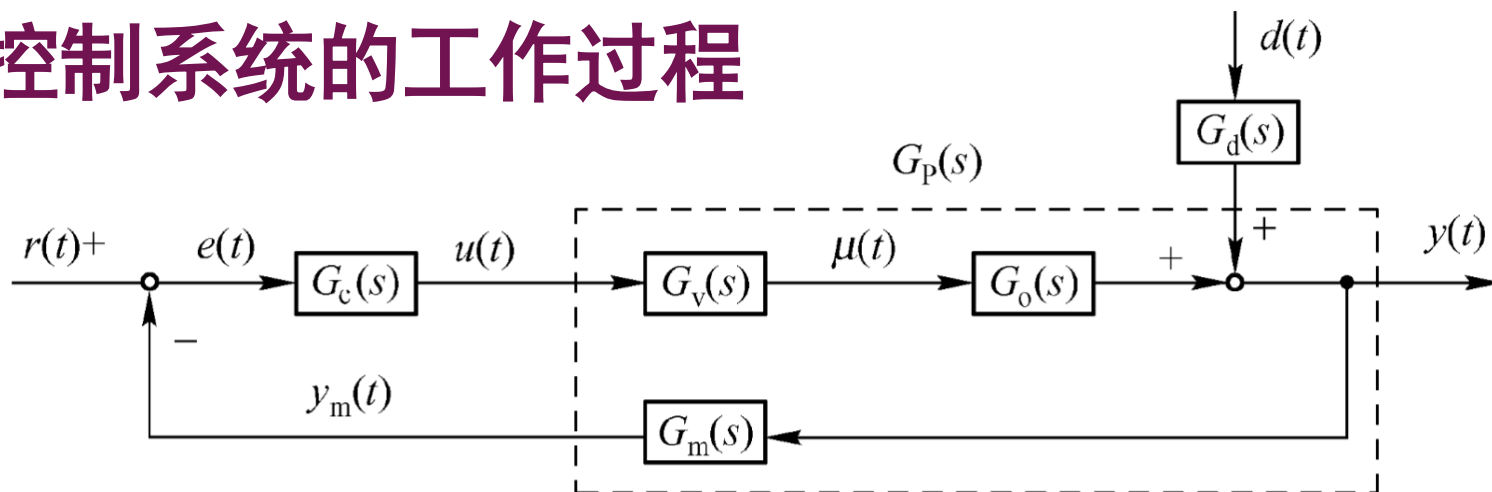
- 根据锅炉汽包液位控制系统结构图，可得简单控制系统的结构图如下：



- 将各个环节分别用传递函数描述后，可得简单控制系统的方框图如下：



简单控制系统的工作过程

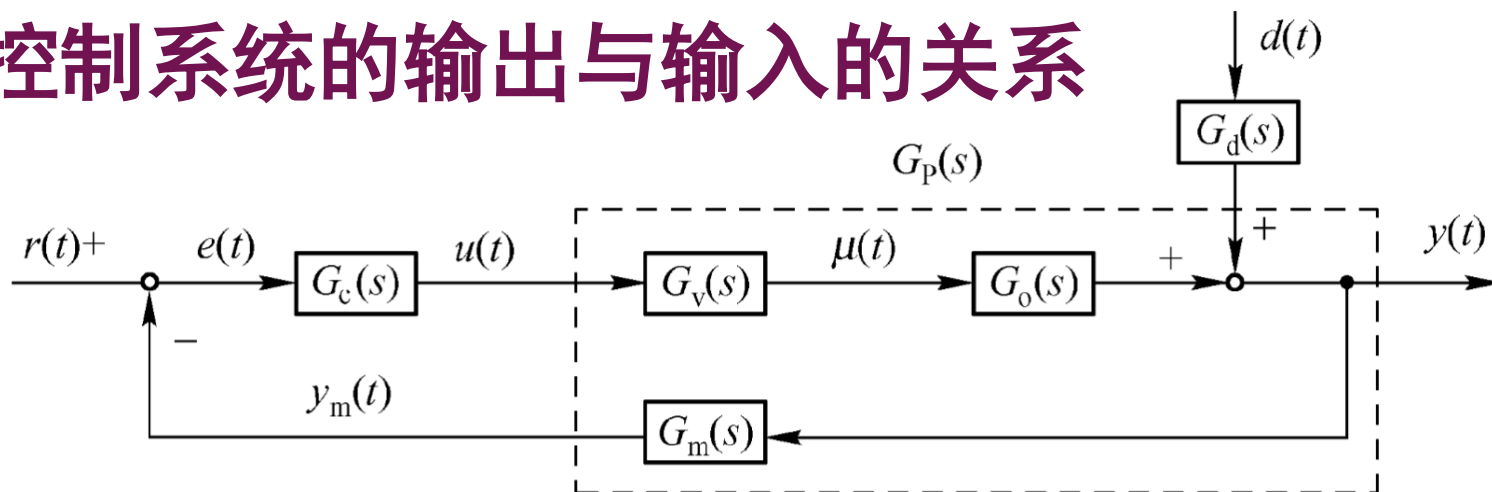


系统工作时，

- 被控过程的输出信号（被控变量） $y(t)$ ，通过测量变送装置后，将其变换为测量值 $y_m(t)$ ，并将测量值反馈到控制器的输入端；
- 控制器根据系统被控变量的设定值 $r(t)$ 与测量值 $y_m(t)$ 的偏差 $e(t)$ ，按照一定的控制算法输出控制量 $u(t)$ ；
- 执行器根据控制器送过来的控制信号 $u(t)$ ，通过改变操纵变量 $\mu(t)$ 的大小，对被控对象进行调节，克服扰动 $d(t)$ 对系统的影响，

从而使被控变量 $y(t)$ 趋于设定值 $r(t)$ ，达到预期的控制目标。

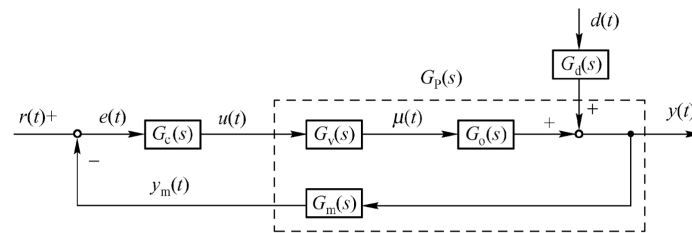
简单控制系统的输出与输入的关系



$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_v(s)G_o(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_o(s)G_m(s)} R(s) + \frac{G_d(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_o(s)G_m(s)} D(s)$$

- 当生产过程平稳运行时，可忽略扰动作用对输出（被控变量）的影响，即 $D(s)=0$ 。此时系统的主要任务是要求输出 $Y(s)$ 能快速跟踪设定值 $R(s)$ ，系统的输出 $Y(s)$ 仅与设定值 $R(s)$ 有关，
- 当设定值 $R(s)$ 在一定时间内保持不变，即 $R(s)=0$ 。此时系统的主要任务是克服扰动 $D(s)$ 对输出 $Y(s)$ 的影响，系统的输出 $Y(s)$ 仅与扰动 $D(s)$ 有关。

广义被控对象

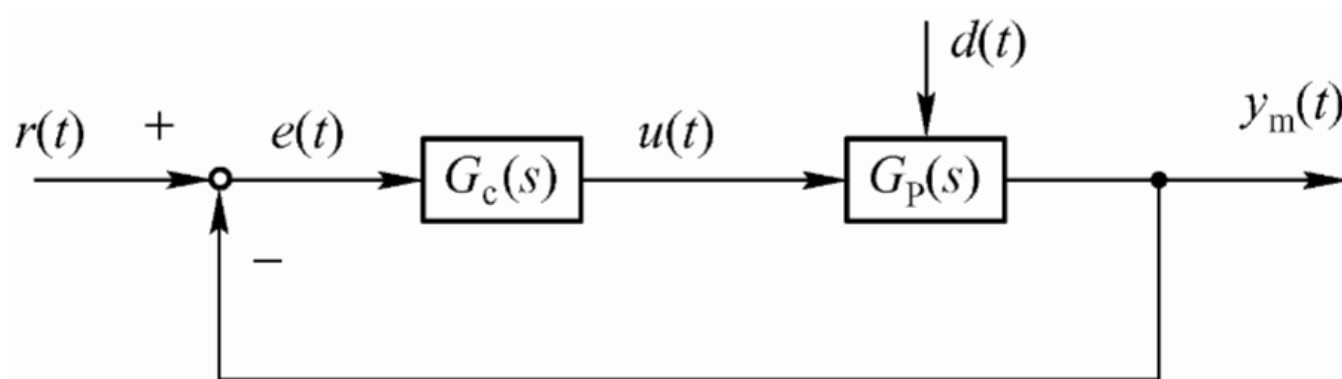


- 在简单控制系统分析和设计时，通常将系统中控制器以外的部分组合在一起，即被控对象、执行器和测量变送装置合并为**广义被控对象**，即

$$G_p(s) = G_m(s)G_0(s)G_v(s)$$

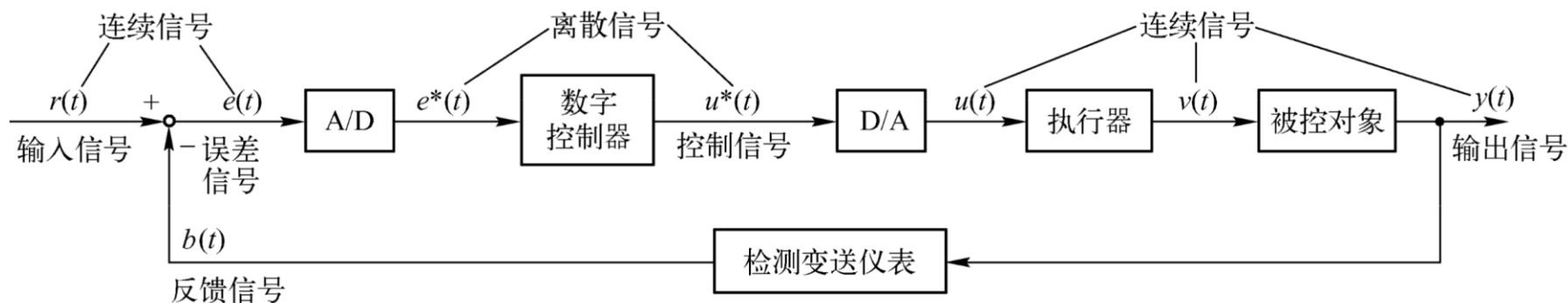
注意顺序!!!

- 因此，也可将**简单控制系统**看成是由**控制器 $G_c(s)$** 和**广义被控对象 $G_p(s)$** 两大部分组成，如图所示：



简单离散控制系统的组成

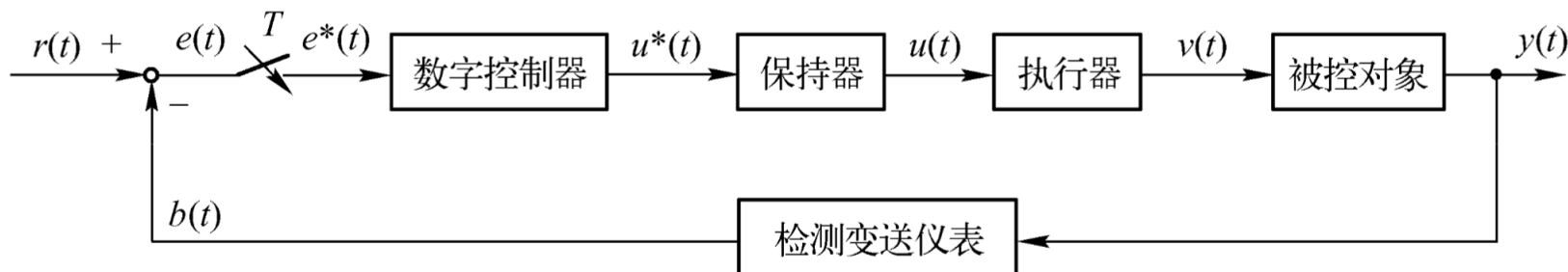
- 随着大规模集成电路、计算机等技术的发展，大量的数字芯片、微处理器和计算机应用于过程控制系统。从最简单的显示仪表、记录仪表，到复杂的控制器、执行器，几乎所有的现代化仪表都离不开数字芯片。
- 目前的任何一块仪表都含有数字芯片，**数字仪表**已经在控制系统当中无处不在。这里仅介绍控制器为数字仪表的**离散控制系统**，框图如下：



- 与连续控制系统显著不同的特点是，离散控制系统中至少有一处或几处信号在时间上为**离散的脉冲或数字信号**。实际中，当连续控制系统中的信号以间断方式获得时，该**连续控制系统**也就变成**离散控制系统**。
- 在离散控制系统中，数字控制器只能处理二进制的数字信号。所以，**数字控制器**接收和输出的信号均为数字信号。
- **模数转换器A/D**，定时地将连续的偏差信号 $e(t)$ 转换成数字控制器能够接收的离散的数字偏差信号 $e(kT)$ 。
- 离散的偏差信号 $e(kT)$ 以二进制脉冲数码送入数字控制器，**数字控制器**按一定要求进行运算后输出离散的控制信号 $u(kT)$ 。
- **执行器**通常按连续信号来控制。所以，由数字控制器输出的离散控制信号 $u(kT)$ ，应先转换成连续信号 $u(t)$ ，这种转换由**数模转换器D/A**实现。
- A/D转换器精度足够高，形成的量化误差可不计，因而输入通道一般把A/D转换器用周期为 T 的**采样开关**代替，D/A转换器相当于一个**保持器**。

离散控制系统/采样控制系统/数字控制系统

- 采用数字控制器的离散控制系统可等效为如下图的**典型离散控制系统**。离散控制系统也称为**采样控制系统**或**数字控制系统**。



- 与连续控制系统比较，离散控制系统设计的一个主要问题是**采样周期 T 的选取**。
- **采样定理**指出，对一个具有有限频谱($-\omega_{\max} < \omega < \omega_{\max}$)的连续信号采样，当采样频率 $\omega_s = 2\pi / T \geq 2\omega_{\max}$ ，那么采样后的信号可以无失真地复现原连续信号。采样定理给出了采样周期 T 的最大值。

采样周期的选择

- 采样周期 T 选得越小，也就是采样频率 ω_s 选得越高，对系统控制过程的信息了解就越多，控制效果就会更好。但是，
 - 采样周期 T 选得过短，将增加不必要的计算负担；
 - 采样周期 T 选得过长，又会给控制过程带来较大误差，降低系统的动态性能，甚至有可能导致整个控制系统失去稳定性。
- 因此，采样周期 T 的选择要根据实际情况综合考虑，合理选择。
- 在一般工业过程控制中，数字仪表所能提供的运算速度，对于采样周期 T 的选择来说，有很大的回旋余地。
- 应当指出，离散信号 $u^*(t)$ 通过保持器完全复现原连续信号 $u(t)$ 的前提是选择恰当的采样周期。

离散控制与连续控制系统

- 在离散控制系统广泛应用的今天，连续控制系统仍然同样非常重要。
- 大多数被控对象的输入输出、传感器的输入、执行器的输出最终都是以模拟连续信号形式出现。
- 目前，很多数字仪表的输入输出信号仍然为模拟连续信号，这些数字仪表都内置了一个采样频率很高的采样开关和保持器。
- 连续控制系统是过程控制系统的基础，离散控制系统在连续控制系统的基础上大幅度地提高了整体系统的控制效果和控制水平。

第5章 简单控制系统

- 5.1 简单控制系统的分析
- **5.2 简单控制系统的设计**
- 5.3 简单控制系统的参数整定
- 5.4 简单控制系统的投运
- 5.5 简单控制系统的故障与处理
- 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

简单控制系统的设计

- 过程控制系统设计是过程工艺、仪表或计算机和控制理论等的综合。
- 在采用常规控制器的简单控制系统设计中，系统设计的主要任务是：
 - 被控变量和操作（或控制）变量的选择
 - 被控对象的数学模型的建立
 - 控制器的设计
 - 测量变送装置和执行器的选型。
- 被控对象的建模方法和执行器的选择原则已分别在第2章和第3章予以详细介绍，它们的使用方法和选择原则完全适用于简单控制系统。
- 本节仅介绍被控变量和控制变量的选择、测量变送装置的选型和控制器的设计。

被控变量的选择方法

- 生产过程中的控制大体上可以分为三类：
 - 物料平衡或能量平衡控制，
 - 产品质量或成分控制，
 - 限制条件的控制。
- 被控变量应当是能表征物料和能量平衡、产品质量或成分及限制条件的关键状态变量。
- 根据被控变量与生产过程的关系，可将其分为两种类型的控制形式：
 - 直接参数控制，
 - 间接参数控制。

选择直接参数作为被控变量

- 能直接反映生产过程中产品的产量和质量，以及安全运行的参数称为**直接参数**。
- 对于以温度、压力、流量、液位为操作指标的生产过程，很明显被控变量就是温度、压力、流量、液位。

选择间接参数作为被控变量

- **质量指标**是产品质量的直接反映。因此，选择质量指标作为被控变量，应是首先要进行考虑的。
- 如果工艺上是按照质量指标进行操作，理应以产品质量作为被控变量进行控制。但是，采用质量指标作为被控变量，必然要涉及产品成分或物性参数（如密度、黏度等）的测量问题，这就需要用到**成分分析仪表和物性参数测量仪表**。
- 有关成分和物性参数的测量问题，目前尚未得到很好地解决，其原因有两个：
 - 一是缺乏各种合适的检测手段；
 - 二是虽有直接参数可测，但信号微弱或测量滞后太大。

被控变量的选择原则

从多个变量中选择一个变量作为被控变量应遵循下列原则：

- 1) 被控变量应当能代表一定的工艺操作指标或能反映工艺操作状态，一般都是工艺过程中比较重要的变量；
- 2) 应尽量选择那些能直接反映生产过程的产品产量和质量，以及安全运行的直接参数作为被控变量。当无法获得直接参数信号，或其测量信号微弱（或滞后很大）时，可选择一个与直接参数有单值对应关系、且对直接参数的变化有足够灵敏度的间接参数作为被控变量；
- 3) 选择被控变量时，必须考虑工艺合理性和国内外仪表产品的现状。

操作变量的选择

- 工业过程的输入变量有两类：操作（或控制）变量和扰动变量。
- 如果用 $\mu(s)$ 表示操作变量，而用 $D(s)$ 表示扰动变量，那么，被控对象的输出 $Y(s)$ 与输入之间的关系可用下式表示。

$$Y(s) = G_0(s)\mu(s) + G_d(s)D(s)$$

- 在生产过程中，干扰是客观存在的，它是影响系统平稳操作的因素，而操作变量是克服干扰的影响，使控制系统重新稳定运行的因素。
- 因此，正确选择一个可控性好的操作（或控制）变量，可使控制系统有效克服干扰的影响，以保证生产过程平稳操作。

操作变量的选择方法

- 在过程控制系统中，把用来克服扰动对被控变量的影响、实现控制作用的变量称为控制（或操作）变量。
- 操作（或控制）变量一般选系统中可以调整的物料量或能量参数。
- 石油、化工生产过程中，遇到的最多的操纵变量则是介质的流量。

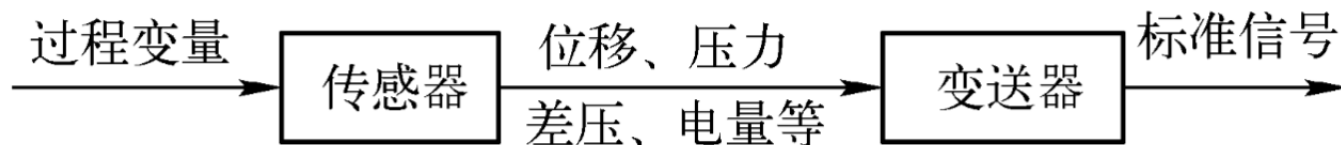
操作变量的选择原则

操纵变量的选取应遵循下列原则：

- 所选的操纵变量必须是**可控**的（即工艺上允许调节的变量），而且在控制过程中该变量变化的极限范围也是**生产允许**的；
- 操纵变量
 - 应该是系统中被控过程的所有输入变量中**对被控变量影响最大**的一个：**控制通道的放大系数要适当大，时间常数适当小，纯迟延时间应当尽量小**；
 - 应尽量**使扰动作用点远离被控变量而靠近调节阀**：为使其他扰动对被控变量的影响减小，应使**扰动通道的放大系数尽可能小，时间常数尽可能大**；
- 在选择操纵变量时，除了从自动化角度考虑外，还需考虑到工艺的合理性与生产的经济性。

检测变送仪表：工作原理

- **检测变送仪表**（包括**检测元件**和**变送单元**）的作用是将工业生产过程的参数（如流量、压力、温度、物位和成分等）经检测并转换为**标准信号**。
 - 在常规仪表中，标准信号通常采用0~10mA、4~20 mA、1~5V电流或电压，0.02~0.1MPa气压信号；
 - 在现场总线仪表中，标准信号是数字信号。
- 检测变送仪表的工作原理如图所示。：



检测变送仪表：传递函数

- 检测元件和变送单元的类型繁多，现场总线仪表的出现使检测变送仪表呈现**模拟和数字并存**的状态。
- 它们都可用带纯迟延的**一阶惯性环节**近似，其传递函数为

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau_m s}$$

K_m 、 T_m 和 τ_m 分别为测量变送装置的**增益、时间常数和纯迟延时间**。

检测变送仪表：基本要求

- 对检测变送仪表的基本要求是**准确、迅速和可靠**。
 - **准确**指传感器和变送器能正确反映被控或被测变量，误差小；
 - **迅速**指应能及时反映被控或被测变量的变化；
 - **可靠**是检测元件和变送器的基本要求，应能在环境工况下长期稳定运行。
- 为此需要考虑以下三个主要问题。
 - 1) 在所处环境下能否正常**长期工作**
 - 2) **动态响应**是否比较迅速
 - 3) **测量误差**是否满足要求

检测变送仪表：信号处理

- 检测变送仪表信号的处理包括：**信号补偿、线性化、信号滤波、数学运算、信号报警和数学变换**等。
- **硬件滤波**通常采用阻容滤波环节，可以用电阻电容组成低通滤波，也可用气阻和气容组成滤波环节。可以组成有源滤波、也可以组成无源滤波等。由于需要硬件的投资，因此成本提高。
- **软件滤波**采用计算方法，利用程序编制各种数字滤波器实现信号滤波，具有投资少、应用灵活等特点，受到欢迎。在智能仪表、DCS等装置中通常采用软件滤波。
- 如果检测变送仪表的信号超出工艺过程的允许范围，就要进行信号报警和联锁处理。

控制器的选型

- 当被控对象、执行器和测量变送装置确定后，便可对控制器进行选型。
- 控制器的选型包括两部分：
 - 控制器的控制规律；
 - 正反作用方式的选择。

控制器控制规律的选择

- 在简单控制系统中，**PID控制**由于它自身的优点仍然是得到最广泛应用的基本控制方式。
- 通常，在选择PID控制器的调节规律时，应根据**对象特性、负荷变化、主要扰动和系统控制要求**等具体情况；同时，还应考虑系统的经济性以及系统投入方便等。

控制器控制规律的选择原则

- 由PID控制器 $G_c(s)$ 和广义被控对象 $G_p(s)$ 两大部分组成的简单控制系统，PID控制器的调节规律可以根据广义被控对象的特点进行选择：
- 1) 广义被控对象控制通道时间常数较大或容积滞后较大时，应引入微分作用。如工艺容许有残差，可选用比例微分控制；如工艺要求无残差时，则选用比例积分微分控制。如温度、成分、pH值控制等。
 - 2) 当广义被控对象控制通道时间常数较小，负荷变化也不大，而工艺要求无残差时，可选择比例积分控制。如管道压力和流量的控制。
 - 3) 广义被控对象控制通道时间常数较小，负荷变化较小，工艺要求不高时，可选择比例控制，如贮罐压力、液位的控制。
 - 4) 当广义被控对象控制通道时间常数或容积迟延很大，负荷变化亦很大时，简单控制系统已不能满足要求，应设计复杂控制系统或先进控制系统。

控制器控制规律的选择原则

➤ 如果被控对象传递函数可近似为：

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

则可根据对象的**可控比** τ/T 选择调节器的动作规律：

- 1) 当 $\tau/T < 0.2$ 时，选择**比例或比例积分控制**；
- 2) 当 $0.2 < \tau/T \leq 1.0$ 时，选择**比例微分或比例积分微分控制**；
- 3) 当 $\tau/T > 1.0$ 时，采用**简单控制系统往往不能满足控制要求**，应选用如串级、前馈等复杂控制系统。

控制器正、反作用方式的选择

- 简单控制系统由**控制器、调节阀、被控对象和测量变送装置**组成。
- 为了保证构成工业过程中的控制系统是一种**负反馈**控制，系统当中**各环节增益的乘积必须为负**。
- 显然，只要事先知道了执行器、被控对象和测量变送装置增益的正负，就可以很容易地确定出控制器增益的正负。

系统中各环节的正反作用方向

- 控制系统中，各环节的作用方向（增益符号）规定：
 - 当该环节的输入信号增加时，若输出信号也随之增加，即输出与输入变化方向相同，则该环节为**正作用**方向；
 - 当输入信号增加时，若输出减小，即输出与输入变化方向相反，则该环节为**反作用**方向。
- 在控制系统中，**每一个环节的正、反作用方向都可以用该环节增益的正负来表示**：
 - 作用方向为正，可将该环节表示为“+”，代表该环节的增益为正
 - 作用方向为负，可将该环节表示为“-”，代表该环节的增益为负。

系统中各环节的正反作用方向

(1) 被控对象正反作用方向的确定

- 被控对象的作用方向，则随具体对象的不同而各不相同。
 - 当该被控对象的输入信号（控制变量）增加时，若其输出信号（被控变量）也增加，即被控变量与控制变量变化方向相同，则该对象属正作用，增益为正，取“+”号；
 - 反之，则为负作用，增益为负，取“-”号。

(2) 执行器正反作用方向的确定

- 对于调节阀，其作用方向取决于是气开阀还是气关阀。
 - 控制器输出信号（调节阀的输入信号）增加时，**气开阀**的开度增加，因而通过调节阀的流体流量也增加，故气开阀是正作用，增益为正，取“+”号；
 - 反之，**气关阀**接收的信号增加时，通过调节阀的流体流量反而减少，所以气关阀是反作用，增益为负，取“-”号。

系统中各环节的正反作用方向

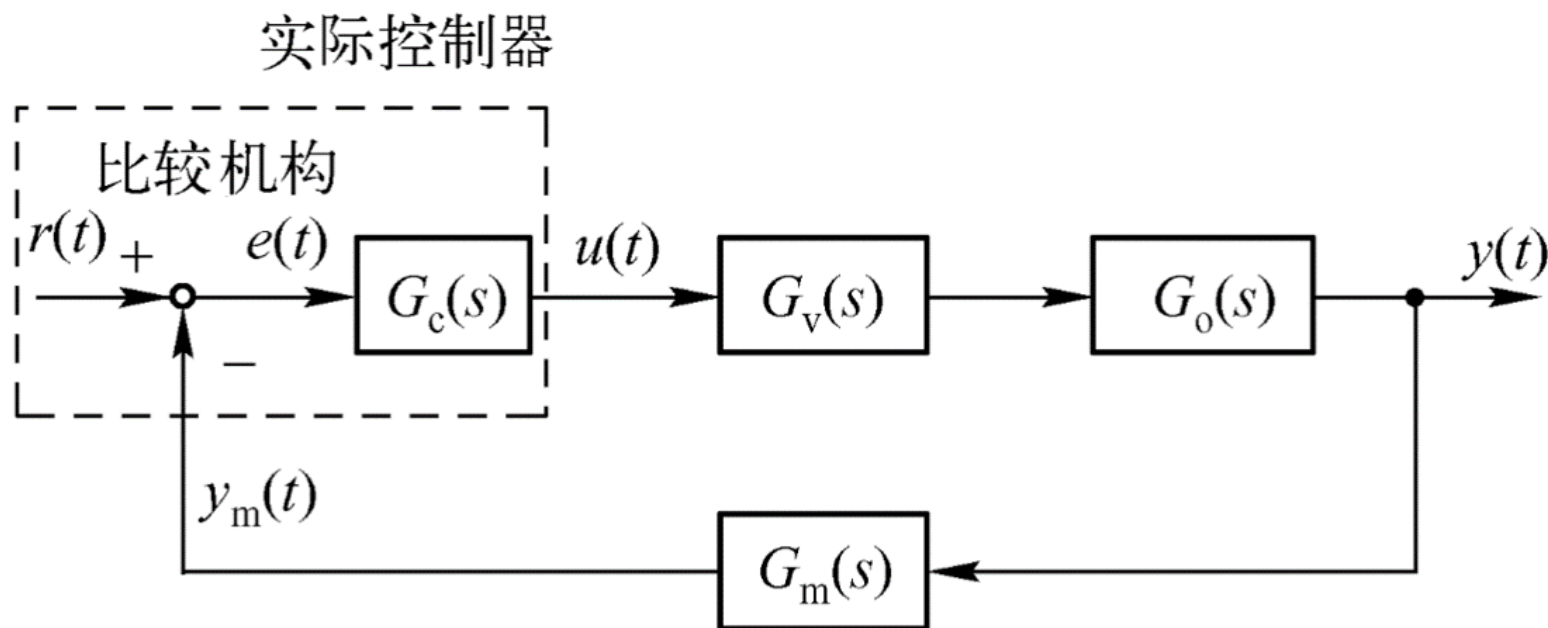
(3) 检测变送仪表正反作用方向的确定

- 对于检测变送仪表，其增益一般均为正，取“+”。
- 当其输入信号（被控变量）增加时，输出信号（测量值）也增加。
- 所以，在考虑整个控制系统的作用方向时，可不考虑检测变送仪表的作用方向，只需考虑控制器、执行器和被控对象三个环节的作用方向，也就是说使它们三者的开环增益之积为负，即可保证系统为负反馈。

系统中各环节的正反作用方向

(4) 控制器正反作用方向的确定

- 为适应不同被控对象实现负反馈控制的需要，工业PID控制器都设置有**正、反作用开关**，以便根据需要将控制器置于正作用或者反作用方式。
- 对于一个工业生产过程的简单控制系统，它的系统原理图可表示为：



系统偏差

两者相差一个负号

- 在**自动控制系统分析**中，一般把偏差定义为

$$e(t)=r(t)-y_m(t)$$

- 强调系统为**负反馈**，在方框图中信号比较机构上的反馈信号 $y_m(t)$ 是带“-”号的；

- 在**仪表制造行业**中，习惯把偏差定义为

$$e'(t)=-e(t)=y_m(t)-r(t)$$

- 在仪表校验时，
 - $y_m(t)>r(t)$ 称为**正偏差**；
 - $y_m(t)<r(t)$ 称为**负偏差**。
- 强调在工业过程控制系统当中，**实际控制器的输入信号**（如反馈信号 $y_m(t)$ ）是不带负号的。

控制器的正、反作用

- 由于仪表制造厂商和控制理论上对系统偏差的定义**正好相反**，用偏差与控制器输出的关系来定义控制器正、反作用时会产生混乱。
- 对于实际控制器的正、反作用是这样定义的：
 - 当**设定值不变、被控变量的测量值增加**时，或者，
当**测量值不变、设定值减小**时，
控制器比例作用时的输出增大，则称其作用方式为**正作用**，取“+”号；
 - 反之，如果测量值增加或设定值减小时，**控制器比例作用时的输出减小**，
则称其作用方式为**反作用**，取“-”号。
- 这一定义**与仪表制造厂商的正、反作用规定完全一致**。即
 - 控制器的**正作用**方式是指**实际控制器的输出信号 $u(t)$ 随着偏差值 $e'(t)$ 的增加（如测量值 $y_m(t)$ 增加）而增加**。
 - **反作用**方式是指 $u(t)$ 随着 $e'(t)$ 的增加（如 $y_m(t)$ 增加）而减小。

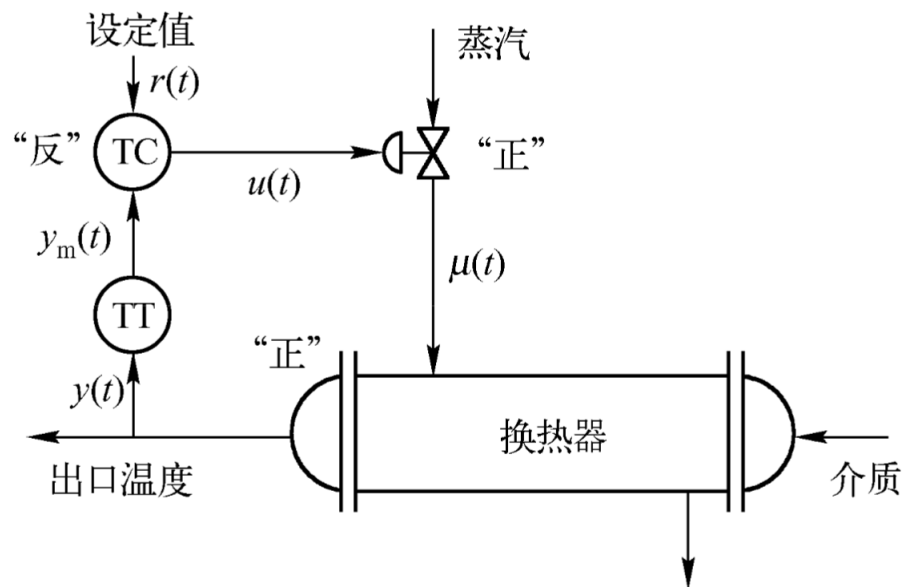
控制器正反作用的确定

- 正反作用方式确定的基本原则是保证系统成为负反馈。
- 控制器的正反作用选择方法有以下两种方法：逻辑推理法和判别式法。

(1) 逻辑推理法

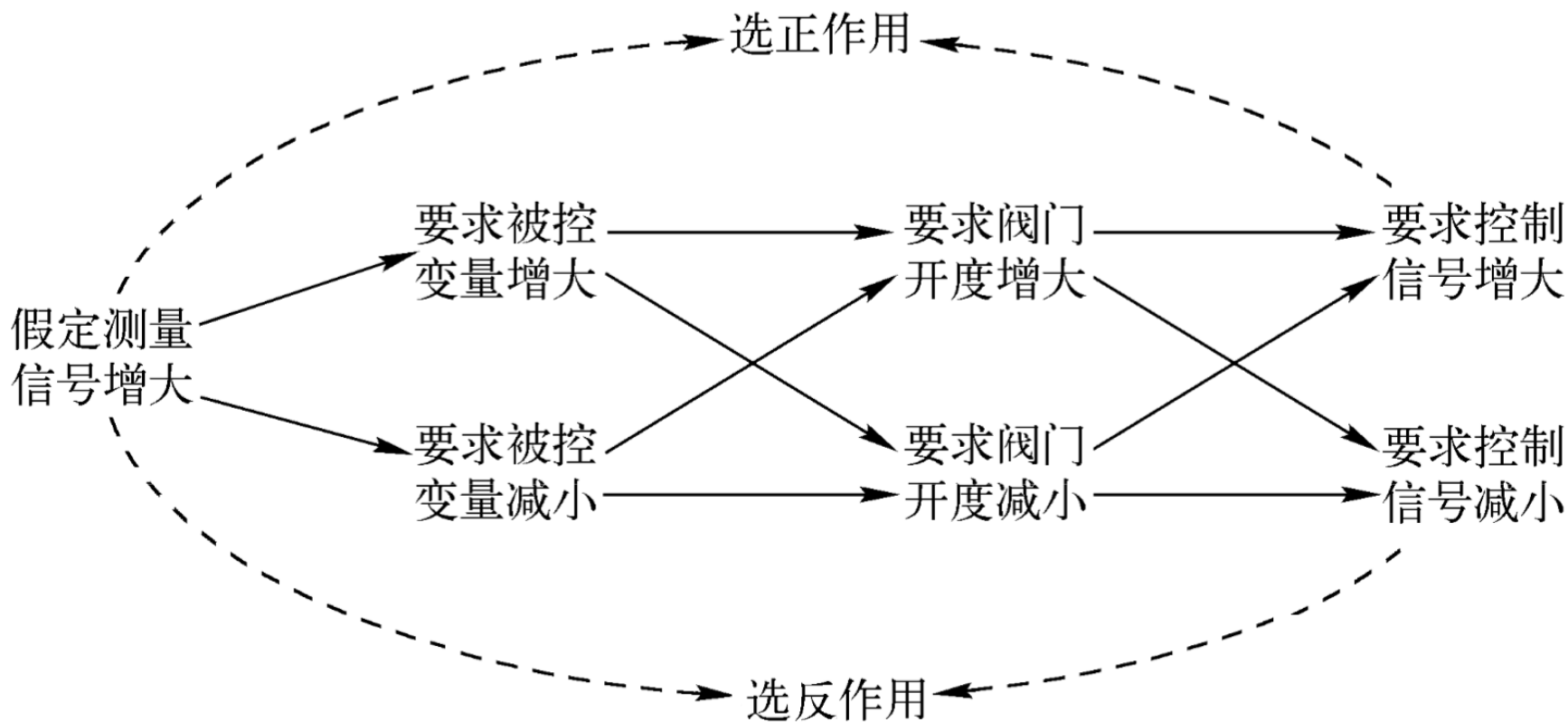
- 负反馈和作用方式是两个不同的概念。为保证过程控制系统为负反馈，就必须通过正确选定控制器的作用方式来实现。
- 对于一个具体给定的广义被控对象，这个选定是简单的常识。

- 假定被控对象是一个加热过程，即利用蒸汽加热某种介质使其出口温度自动保持在某设定值，如图所示。

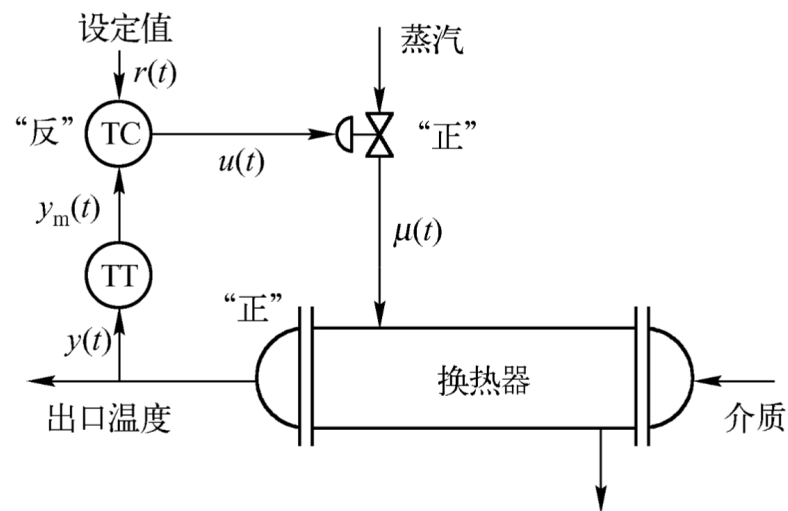
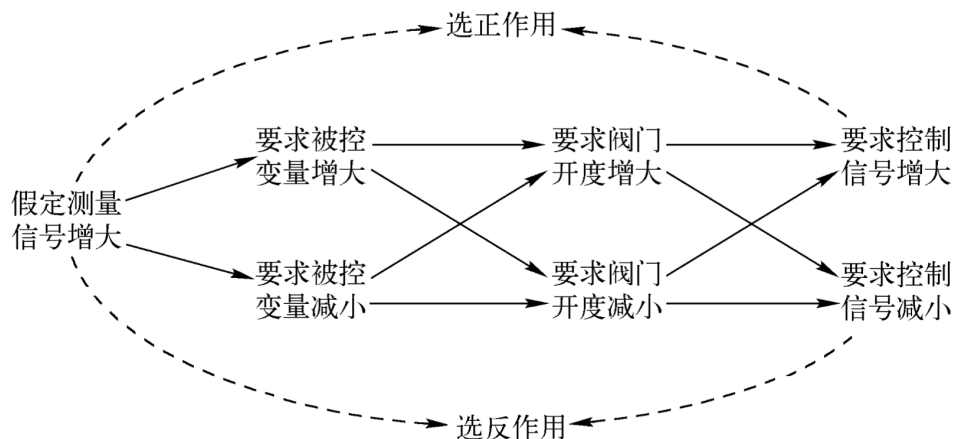


- 如果蒸汽调节阀的开度 $\mu(t)$ 随着控制信号 $u(t)$ 的加大而加大：
- 就广义被控对象（调节阀+换热器+温度测量变送器）来看，显然介质出口温度的测量值 $y_m(t)$ （假设 $y_m(t)$ 与 $y(t)$ 同号）将会随着控制信号 $u(t)$ 的加大而升高；
 - 如果介质出口温度的测量值 $y_m(t)$ 升高了，控制器就应减小其输出信号 $u(t)$ 才能正确地起负反馈控制作用；
 - 因此，控制器应置于反作用方式下。

控制器正、反作用选择的推理过程



换热器温度控制系统中控制器正、反作用选择



假定介质出口温度的测量值 $y_m(t)$ 增大了，

- ▶ 在测量环节为正作用时，如要求维持测量值 $y_m(t)$ 不变，就一定要想办法减小介质出口温度；
- ▶ 对该加热过程，就要求减小蒸汽阀的开度；
- ▶ 在选用正作用调节阀时，就要求减小控制信号 $u(t)$ 。

因此，根据**测量值增大，要求控制信号减小**，可知控制器应选**反作用方式**。

(2) 判别式法

- 控制器的正、反作用也可以借助于控制系统方框图加以确定。
- 对于包含控制器、执行器、被控对象和测量变送器4个环节的简单控制系统，这个方法更为简便。
- 由前可知，为保证使整个系统构成负反馈的闭环系统，系统当中实际控制器、执行器、被控对象和测量变送器四部分的开环增益之积必须为负，即

$$\begin{aligned} & (\text{实际控制器}\pm) \quad \times \\ & (\text{执行器}\pm) \quad \times \\ & (\text{被控对象}\pm) \quad \times \\ & (\text{测量变送器}\pm) \\ & = (-) \end{aligned}$$

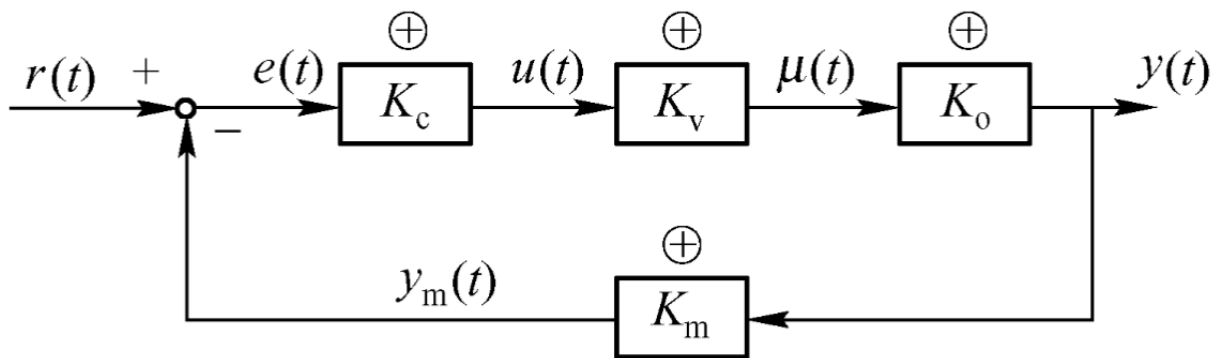
- 实际控制器的增益与其运算环节的增益符号相反。或者，在方框图中为了强调系统为负反馈，将“-”号放在反馈信号上，此时负反馈就要求闭合回路上所有环节（仅包括控制器的运算环节）的增益之乘积为正，即

$$\begin{aligned}
 & (\text{实际控制器的运算环节} \pm) && \times \\
 & (\text{执行器} \pm) && \times \\
 & (\text{被控对象} \pm) && \times \\
 & (\text{测量变送器} \pm) && \\
 & && = (+)
 \end{aligned}$$

- 测量变送器的增益一般均为正，所以控制器正、反作用选择的判别式可简化为

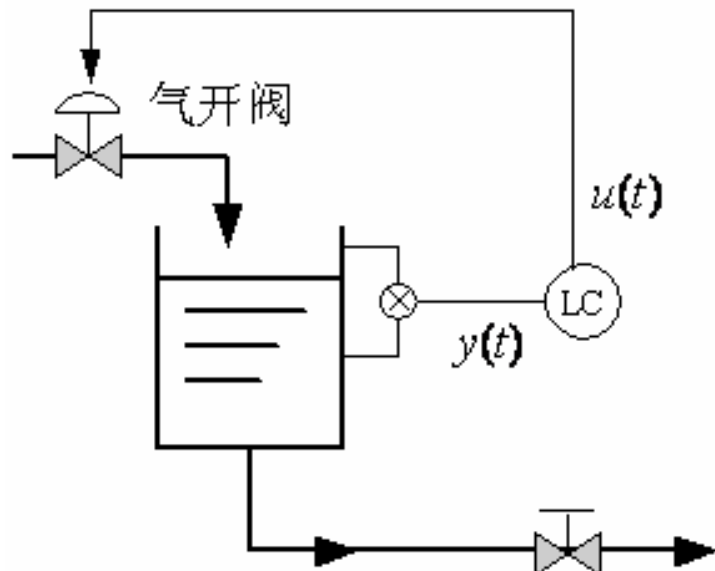
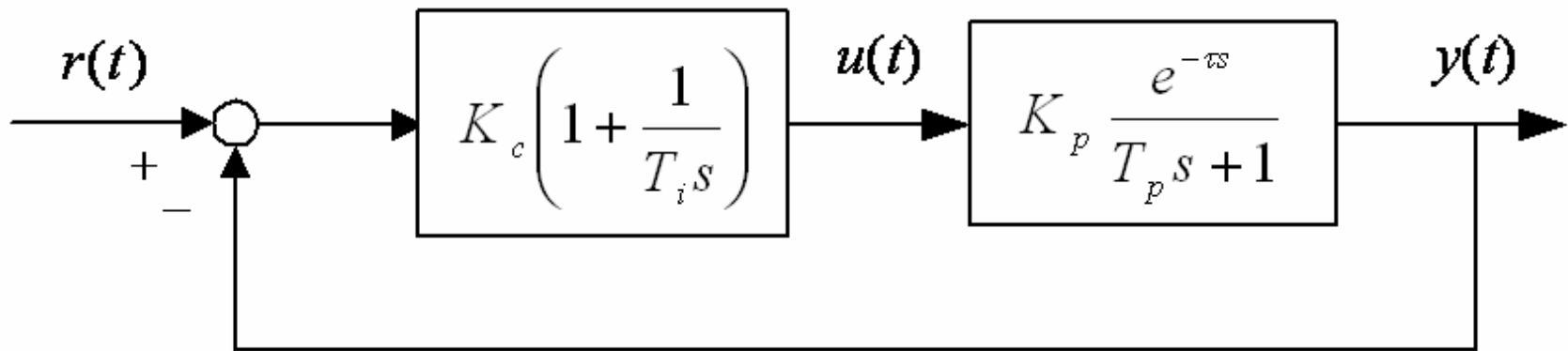
$$\begin{aligned}
 & (\text{实际控制器的运算环节} \pm) && \times \\
 & (\text{执行器} \pm) && \times \\
 & (\text{被控对象} \pm) && \\
 & && = (+)
 \end{aligned}$$

根据方框图确定控制器正反作用



- 图中画出了加热器温度控制系统方框图，其中
 - K_0 、 K_v 和 K_m 分别代表被控过程、调节阀和测量变送装置的增益；
 - K_c 代表实际控制器运算环节的增益；
 - μ 为调节阀的开度；
 - y_m 为被控变量 y 的测量值。
- K_0 、 K_v 和 K_m 都是正数。因此，为满足系统为负反馈要求 K_c 为正，即要求控制器置于反作用方式

水位控制系统举例：



在初始稳态条件下，有关系式：

$$r(0) = y(0) = k_p u_0, \quad K_c > 0, \quad K_p > 0$$

$$t \geq 0$$

$$y(t) \uparrow \quad \longrightarrow \quad u(t) \downarrow$$

第5章 简单控制系统

- 5.1 简单控制系统的分析
- 5.2 简单控制系统的设计
- **5.3 简单控制系统的参数整定**
- 5.4 简单控制系统的投运
- 5.5 简单控制系统的故障与处理
- 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

控制器的参数整定

- 当系统安装好以后，系统能否在最佳状态下工作，主要取决于**控制器各参数的设置是否得当**。
- 过程控制中，通常都是选用工业成批生产的不同类型的调节器，这些调节器都有一个或几个整定参数和调整这些参数的相应机构(如旋钮、开关等)。
- **系统整定**，就是通过调整控制器的这些参数使其特性与被控对象特性相匹配，以达到最佳的控制效果。
- 常把这种整定称作“**最佳整定**”，这时的调节器参数叫做“**最佳整定参数**”。

控制器参数整定的基本要求

- 衡量调节器参数是否最佳，需要规定一个明确的统一的反映控制系统质量的性能指标。
- 例如，最大动态偏差尽可能小、调节时间最短、调节过程系统输出的误差积分值最小等。
- 然而，改变调节器参数可以使某些指标得到改善，而同时又会使其其它的指标恶化。
- 此外，不同生产过程对系统性能指标的要求也不一样，因此系统整定时性能指标的选择有一定灵活性。

系统整定中采用的性能指标

1. 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)
- 振荡周期

2. 误差积分性能指标

- 如 **IE、IAE、ISE、ITAE**
- 误差积分指标往往与其它指标并用，很少作为系统整定的单一指标。

整定方法

➤ 理论计算整定法

- 如根轨迹法、频率特性法。
- 这类整定方法**基于被控对象数学模型**(如传递函数、频率特性)，通过计算方法直接求得调节器整定参数。

➤ 工程整定法

- 不需要事先知道过程的数学模型，直接在过程控制系统中进行现场整定
- 有一些是基于对象的阶跃响应曲线，有些则直接在闭环系统中进行，方法简单，计算简便，易于掌握
- 虽然它们是一种近似的经验方法，但相当实用

PID控制器参数的整定

➤ PID控制器参数的工程整定

1. 动态特性参数法

- 1) Z-N工程整定方法
- 2) C-C工程整定方法
- 3) 以各种误差积分值为系统性能指标的工程整定方法

2. 稳定边界法

3. 衰减曲线法

4. 经验整定法

5. 广义被控对象和等效调节器

6. 调节器各参数实际值与刻度值

➤ PID控制器参数的自整定

1. 动态特性参数法

- 这是一种开环整定方法，以被控对象控制通道的阶跃响应曲线为依据，通过一些经验公式求取控制器最佳参数整定值的。
- 用这种方法进行PID控制器参数整定值的前提是，将系统简化为由控制器 $G_c(s)$ 和广义被控对象 $G_p(s)$ 两大部分组成。
- 其中，广义被控对象的阶跃响应曲线，可用一阶惯性环节加纯迟延来近似。
- 否则，根据以下几种动态特性参数整定方法得到的控制器整定参数，只能作初步估计值。

$$G_c(s) = K_C \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] = \frac{1}{\delta} \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right]$$

1) Z-N工程整定方法

- 以被控对象控制通道的阶跃响应为依据，通过一些经验公式，求取调节器最佳参数整定值的开环整定方法。
- 这种方法是由齐格勒(Ziegler)和尼科尔斯(Nichols)于1942年首先提出的，计算调节器整定参数的公式如表所示
- 其中， K 为系统的放大系数， T 为时间常数， τ 为纯滞后时间。

Z-N调节器整定参数公式			
	δ	T_I	T_D
P	$K(\tau/T)$		
PI	$1.1 K(\tau/T)$	3.3τ	
PID	$0.85 K(\tau/T)$	2.0τ	0.5τ

2) C-C工程整定方法

- 以衰减率($\psi = 0.75$)为系统的性能指标, K , T , τ 为对象动态特性参数
柯恩(Cohen)-库思(Coon)整定公式:

- (1) 比例调节器

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

- (2) 比例积分调节器

$$K_c K = 0.9(\tau / T)^{-1} + 0.082$$

$$T_I / T = [3.33(\tau / T) + 0.3(\tau / T)^2] / [1 + 2.2(\tau / T)]$$

- (3) 比例积分微分调节器

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

3) 基于系统性能指标的工程整定方法

- 随着仿真技术的发展，又提出了以各种误差积分值为系统性能指标的PID控制器最佳参数整定公式

$$\begin{cases} KK_C = A(\tau / T)^{-B} \\ T_I / T = C(\tau / T)^D \\ T_D / T = E(\tau / T)^F \end{cases}$$

- 其中，以上整定公式中的各系数在不同误差积分性能指标下的取值如表所示。

定值系统时公式中的常数

性能指标	调节规律	A	B	C	D	E	F
Z-N IAE ISE ITAE	P	1.000 0.902 1.411 0.904	1.000 0.985 0.917 1.084				
Z-N IAE ISE ITAE	PI	0.900 0.984 1.305 0.859	1.000 0.986 0.959 0.977	3.333 1.644 2.033 1.484	1.000 0.707 0.739 0.680		
Z-N IAE ISE ITAE	PID	1.200 1.435 1.495 1.357	1.000 0.921 0.945 0.947	2.000 1.139 0.917 1.176	1.000 0.749 0.771 0.738	0.500 0.482 0.560 0.381	1.000 1.137 1.006 0.995

2. 稳定边界法

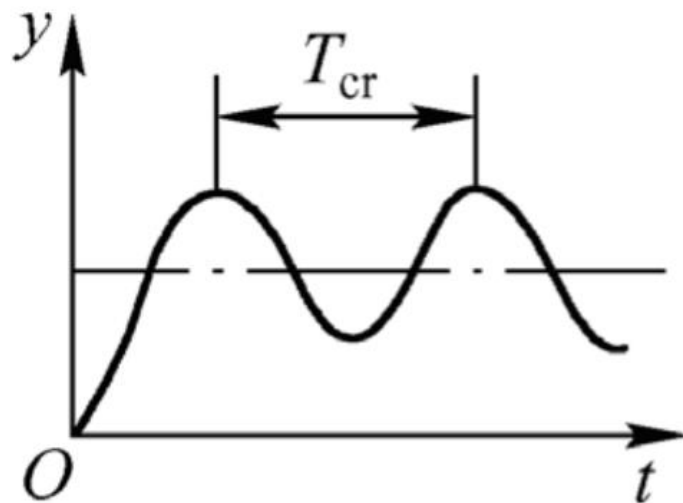
- 这是一种**闭环的整定方法**。
- 它基于纯比例控制系统临界振荡试验所得数据，即**临界比例带 δ_{cr}** 以及**临界振荡周期 T_{cr}** ，利用一些经验公式，求取调节器最佳参数值。

临界比例带法

- 在闭合的控制系统里，将调节器置于纯比例作用下，从大到小地逐渐改变调节器的比例带，得到等幅振荡的过渡过程。
- 此时的比例带称为**临界比例带 δ_{cr}** ，相邻两个波峰间的时间间隔，称为**临界振荡周期 T_{cr}** 。

临界比例带法的具体步骤

1. 将调节器的**积分时间** T_I 置于最大 ($T_I = \infty$)，**微分时间** 置零 ($T_D = 0$)，**比例度** δ 适当，平衡操作一段时间，把系统投入自动运行。
2. 将**比例度** δ 逐渐**减小**，得到**等幅振荡**过程，记下**临界比例带** δ_{cr} 和**临界振荡周期** T_{cr} 值。
3. 利用 δ_{cr} 和 T_{cr} 值，按表给出的相应计算公式，求调节器各**整定参数** δ 、 T_I 和 T_D 的数值。
4. 按照“**先P后I最后D**”的操作程序，将调节器整定参数调到计算值上。若还不够满意，可再作进一步调整。



稳定边界法参数整定计算公式

	δ	T_I	T_D
P	$2\delta_{cr}$		
PI	$2.2\delta_{cr}$	$0.85T_{cr}$	
PID	$1.67\delta_{cr}$	$0.50T_{cr}$	$0.125T_{cr}$

稳定边界法的应用

➤ 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**，不能依据此的数据来计算整定参数。

➤ 应当指出

- 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。
- 实践证明，对于**无自平衡特性的对象**，用稳定边界法求得的调节器参数，往往使系统响应的衰减率偏大($\psi > 0.75$)；
- 对于有**自平衡特性的高阶等容对象**，用此法整定调节器参数，系统响应的衰减率大多偏小($\psi < 0.75$)。
- 为此，上述求得的调节器参数，需要针对具体系统，**在实际运行过程中作在线校正**。

稳定边界法的应用限制

- 稳定边界法适用于许多过程控制系统。
- 但对于如锅炉水位控制系统那样的**不允许进行稳定边界试验**的系统，或者**某些时间常数较大的单容对象**，采用纯比例控制时系统本质稳定。对于这些系统是无法用稳定边界法来进行参数整定的。

临界比例带法整定注意事项

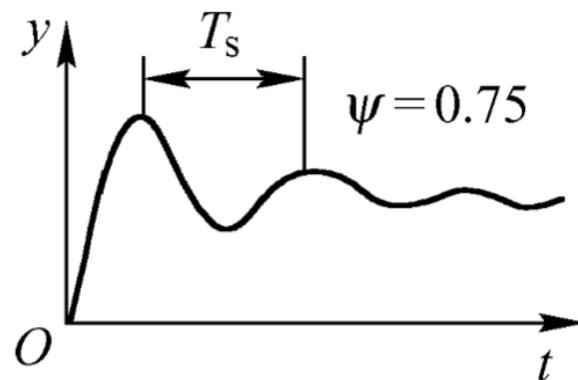
- 有的过程控制系统，**临界比例度很小**，使系统接近两式控制，调节阀不是全关就是全开，对工业生产不利。
- 有的过程控制系统，当调节器比例度 δ 调到最小刻度时，系统仍**不产生等幅振荡**。对此，就把最小刻度的比例度作为临界比例度 δ_{cr} ，进行调节器参数整定。

3.衰减曲线法

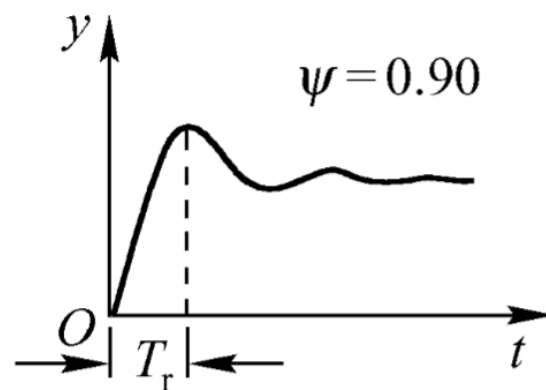
- 与稳定边界法类似，不同的是，本法采用某衰减比(通常为4:1或10:1)时设定值扰动的衰减振荡试验数据，然后利用一些经验公式，求取调节器相应的整定参数。

4: 1衰减曲线法的具体步骤

- 1) 置调节器的积分时间 T_I 为最大值($T_I = \infty$)，微分时间 T_D 为零 ($T_D = 0$)，比例带 δ 置较大值，并将系统投入运行。
- 2) 把比例度 δ 从大逐渐调小，直到系统出现如图 (a)所示的4: 1衰减振荡过程。记下此时的比例带 δ_s 和振荡周期 T_s 数值。



(a) 4:1衰减响应过程



(b) 10:1衰减响应过程

- 3) 利用 δ_s 和 T_s 值，按表给出的经验公式，求调节器整定参数 δ 、 T_I 和 T_D 数值。

衰减率 ψ	调节规律	δ	T_I	T_D
0.75	P	δ_s		
	PI	$1.2 \delta_s$	$0.5 T_s$	
	PID	$0.8 \delta_s$	$0.3 T_s$	$0.1 T_s$
0.90	P	δ_s		
	PI	$1.2 \delta_s$	$2 T_r$	$0.4 T_r$
	PID	$0.8 \delta_s$	$1.2 T_r$	

- 4) 按“**先P后I最后D**”的操作程序，将求得的整定参数设置在调节器上。再观察运行曲线，若不太理想，还可作适当调整。

衰减曲线法注意事项

- 对于扰动频繁，**过程进行较快的控制系统**，要准确地确定系统响应的衰减程度比较困难，往往只能根据调节器输出摆动次数加以判断。
- 对于4:1衰减过程，调节器输出应来摆动两次后稳定。摆动一次所需时间即为 T_s 。显然，这样测得的 T_s 和 δ_s 值，会给调节器参数整定带来误差。
- 在生产过程中，**负荷变化会影响过程特性**。当负荷变化较大时，必须重新整定调节器参数值。
- 若认为**4:1**衰减太慢，宜应用**10:1**衰减过程。对于10:1衰减曲线法整定调节器参数的步骤与上述完全相同，仅仅采用计算公式有些不同。

4. 经验整定法

- 在现场控制系统整定工作中，经验丰富的运行人员常采用**经验整定法**。
- 这种方法实质上是一种**经验试凑法**，它不需要进行上述方法所要求的试验和计算，而是根据运行经验，先确定一组调节器参数，并将系统投入运行，然后人为加入阶跃扰动(通常为调节器的设定值扰动)，观察被调量或调节器输出的阶跃响应曲线，并依照调节器各参数对调节过程的影响，改变相应的整定参数值。
- 一般先 δ 后 T_I 和 T_D ，如此反复试验多次，直到获得满意的阶跃响应曲线为止。

现场凑试法

- 按照**先比例（P）、再积分（I）、最后微分（D）**的顺序：
 - 置调节器积分时间 $T_I=\infty$ ，微分时间 $T_D=0$ ，在比例度 δ 按经验设置的初值条件下，将系统投入运行，**整定比例度 δ** 。求得满意的4: 1过渡过程曲线。
 - 引入**积分作用**（此时应将上述比例度 δ 加大1.2倍）。将 T_I 由大到小进行整定。
 - 若需引入**微分作用**时，则将 T_D 按经验值或按 $T_D=(1/3\sim 1/4) T_I$ 设置，并由小到大加入。
- 下表分别就不同对象，给出调节器参数的经验数据以及设定值扰动下调节器各参数对调节过程的影响。
- 这种方法使用得当，同样可以获得满意的调节器参数，取得最佳的控制效果。而且此方法省时，对生产影响小。

表 5-5 经验法控制器参数估计值

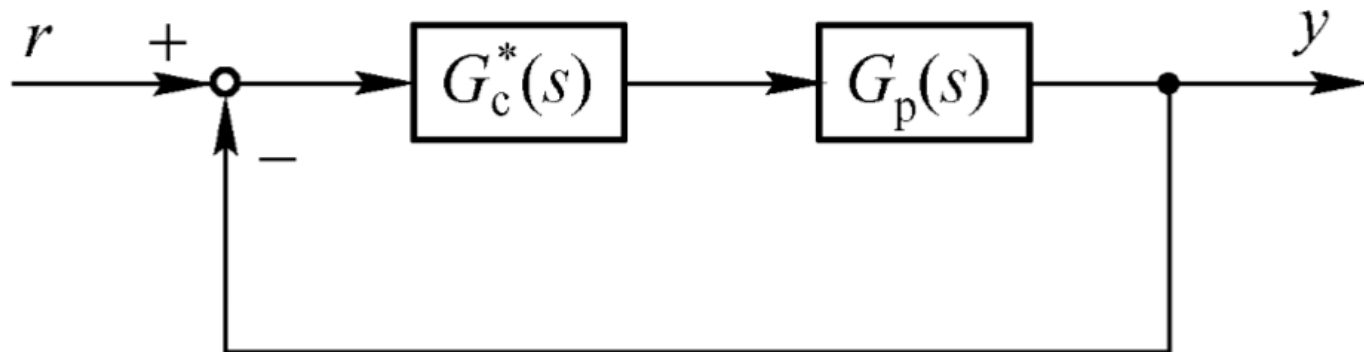
被控对象 \ 整定参数	$\delta/\%$	T_i/min	T_d/min
液 位	20~80	—	—
流 量	40~100	0.1~1	—
压 力	30~70	0.4~3	—
温 度	20~60	3~10	0.5~3

表 5-6 设定值扰动下整定参数对调节过程的影响

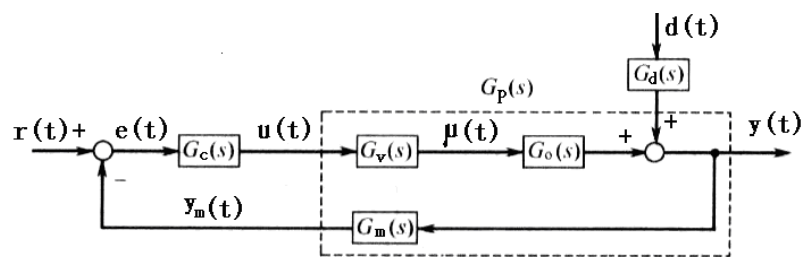
性能指标 \ 整定参数	$\delta \downarrow$	$T_i \downarrow$	$T_d \uparrow$
最大动态偏差	\uparrow	\uparrow	\downarrow
残差	\downarrow	—	—
衰减率	\downarrow	\downarrow	\uparrow
振荡频率	\uparrow	\uparrow	\uparrow

5. 广义被控对象和等效调节器

- 动态特性参数法整定计算时，常常把简单控制系统简化为调节器和被控对象两大环节，分别称为**等效调节器**和**广义被控对象**。
- 它们之间如何划分会直接影响实际调节器参数与等效调节器参数之间的关系。



方法一



- 通过试验测取动态特性，如果调节阀并未考虑在被控对象的范围之内，则广义被控对象的传递函数 $G_p(s)$ 为

$$G_p(s) = G_m(s)G_o(s)$$

- 此时，等效调节器的传递函数 $G_c^*(s)$ 为

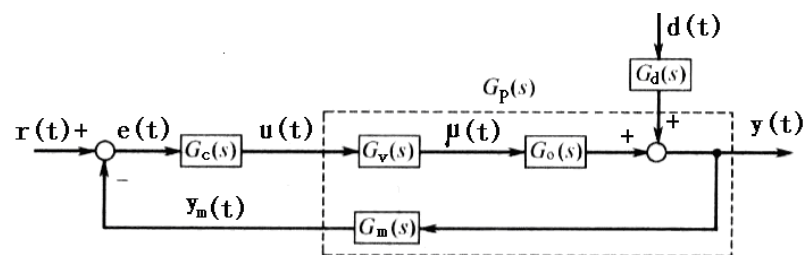
$$G_c^*(s) = G_v(s)G_c(s)$$

- 由于调节阀 $G_v(s)$ 可近似视为比例环节，即 $G_v(s)=K_v$ ，因此，当调节器为PID作用时，等效PID调节器的传递函数为

$$G_c^*(s) = K_v \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = \frac{1}{\delta'} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

式中， $\delta' = \delta / K_v$ 为等效比例带。

方法二



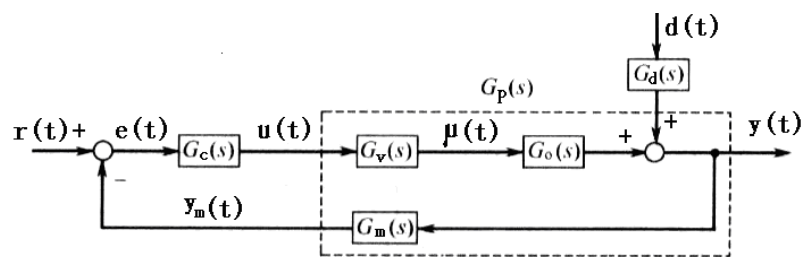
- 如果试验测取的广义对象动态特性已包括调节阀，即

$$G_p(s) = G_m(s)G_o(s)G_v(s)$$

- 则等效调节器就是调节器本身，即

$$G_c^*(s) = G_c(s) = \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

方法三

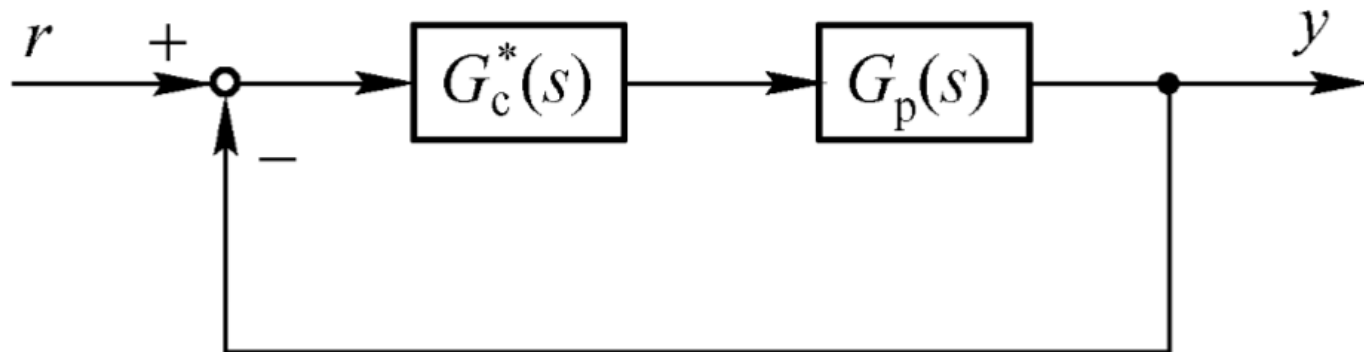


- 如果用机理法求得被控对象动态特性为 $G_0(s)$ ，此时可以认为广义被控对象 $G_p(s) = G_0(s)$ 。
- 如果将测量变送装置也近似为比例环节，即 $G_m(s) = K_m$ ，那么当控制器为PID作用时，等效控制器的传递函数为

$$G_c^*(s) = G_m(s)G_v(s)G_c(s) = \frac{1}{\delta^*} \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

- 式中， $\delta^* = \delta / K_v K_m$ 为等效比例带， K_m 为测量变送装置的转换系数

- 上述的不论是调节器参数理论计算方法还是工程整定法中的动态特性参数法，都是以图示的由广义被控对象 $G_p(s)$ 和等效调节器 $G_c^*(s)$ 组成的简单控制系统为基础的。
- 这样，整定计算所得的均为等效调节器的等效比例带，必须经过换算后才得到调节器的比例带。



6. 调节器各参数实际值与刻度值

- 整定计算得到的是调节器各参数的**实际值**。
- 对于模拟PID控制器或早期仿模拟的数字PID控制器（在不引起混淆的情况下，仍将这些控制器简称为PID控制器），由于 δ 、 T_I 和 T_D 各参数之间存在相互干扰，必须考虑PID调节器各**参数实际值**与**刻度值**之间的转换关系。
- 由调节器动态特性分析可知，**干扰系数** F 为
$$F = 1 + \alpha \frac{T_D^*}{T_I^*}$$
 - T_D^* 、 T_I^* 分别为PID调节器微分时间和积分时间的刻度值；
 - α 为与调节器结构有关的系数。

- 对于不同类型的调节器，系数 α 各不相同，且随 T_D 、 T_I 取值不同而变化。
- 通过分析可知，PID调节器**整定参数的实际值、刻度值与干扰系数F之间关系**如下：
$$\delta^* = F\delta;$$

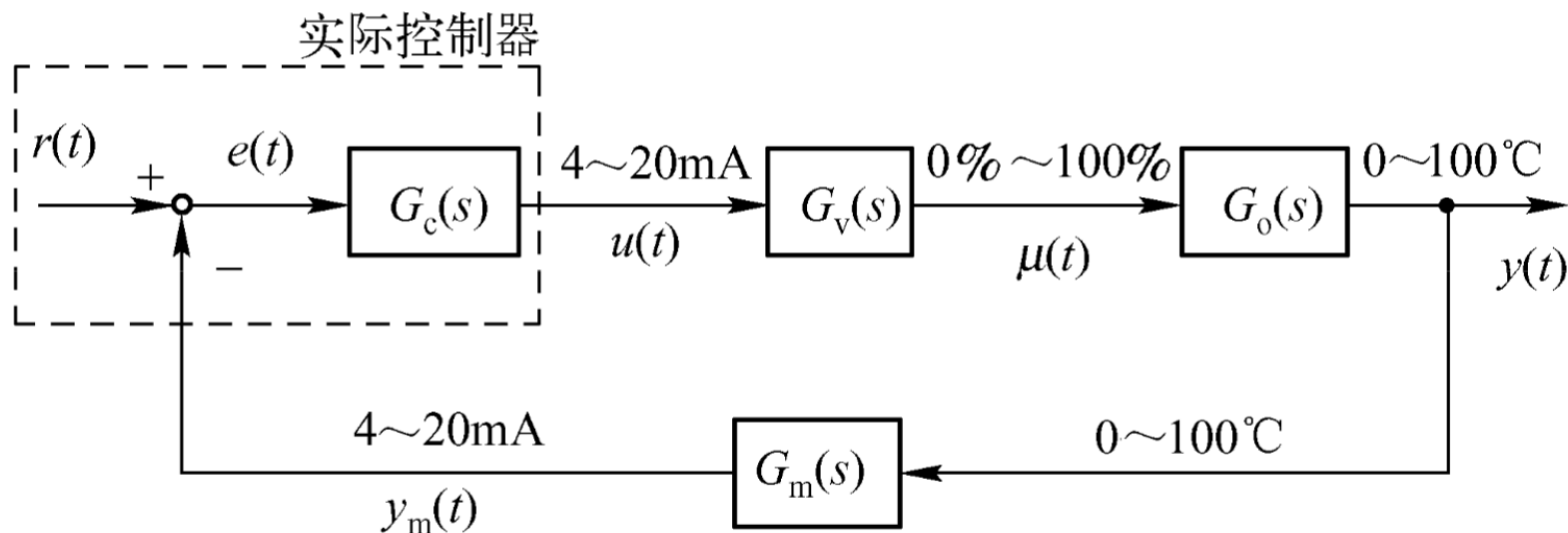
$$T_I^* = \frac{1}{F}T_I;$$

$$T_D^* = FT_D$$

- 式中， δ 、 T_I 和 T_D 分别为调节器比例带、积分时间、微分时间的**实际值**， δ^* 、 T_I^* 和 T_D^* 分别为调节器比例带、积分时间、微分时间的**刻度值**。
- **调节器处于 P、PI和 PD工作状态时， $F \approx 1$** ，可近似地认为调节器参数的刻度值和实际值是一致的。
- **当处于 PID工作状态时， $F > 1$ ，且为 T_D^*/T_I^* 的函数。**
- 所以，在整定 PID调节器各参数时，必须由它的实际值计算调节器参数的刻度值。

例5-1

- 某温度控制系统采用**PI**调节器。在调节阀扰动量 $\Delta\mu=20\%$ 时，测得温度控制通道阶跃响应特性参数：稳定时温度变化 $\Delta\theta(\infty)=60^\circ\text{C}$ ；时间常数 $T=300\text{s}$ ；纯迟延时间 $\tau=10\text{s}$ 。温度变送器量程为 $0\sim 100^\circ\text{C}$ ，且温度变送器和调节器均为 DDZ—III型仪表。试求调节器 δ 、 T_I 的刻度值。



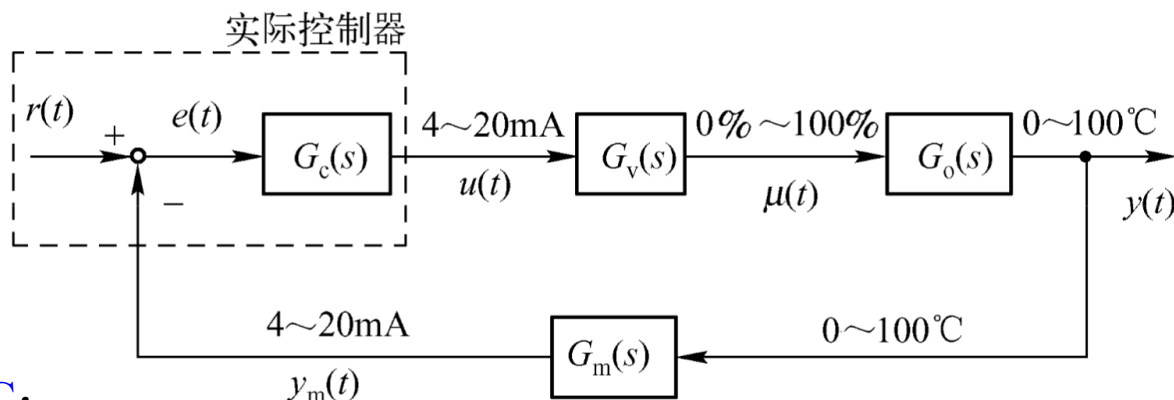
PI调节器:

时间常数 $T=300s$;

纯迟延时间 $\tau=10s$ 。

温度变送器量程为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$

$\Delta\mu=20\%$ 时, $\Delta\theta(\infty)=60^{\circ}\text{C}$;



(1) 确定控制器的比例带

被控对象的传递函数为
$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{\mu(s)} = \frac{K_0}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s}$$

$$K_0 = \frac{\Delta\theta}{\Delta\mu} = \frac{60}{20} = 3(^{\circ}\text{C}/\%)$$

测量变送装置和调节阀均近似视为**比例环节**, 则据图可得测量变送装置的转换系数和调节阀的增益分别为:

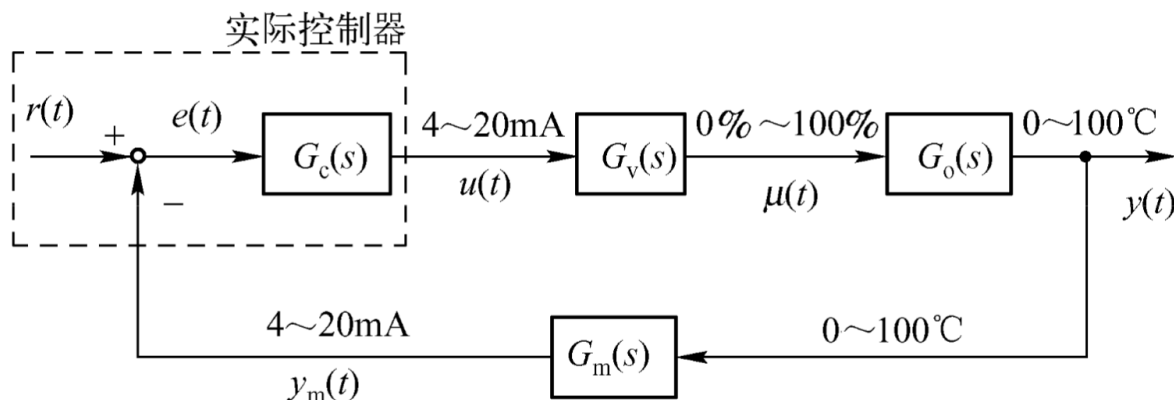
$$K_m = \frac{20 - 4}{100 - 0} = \frac{16}{100} (\text{mA}/^{\circ}\text{C}) \quad K_v = \frac{100 - 0}{20 - 4} = \frac{100}{16} (\% / \text{mA})$$

$$K_m = \frac{16}{100} (\text{mA} / ^\circ\text{C})$$

$$K_v = \frac{100}{16} (\% / \text{mA})$$

$$K_0 = 3 (^\circ\text{C} / \%)$$

$$G_0(s) = \frac{K_0}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s}$$



① 广义被控对象的传递函数为

$$G_p(s) = G_v(s)G_0(s)G_m(s) = \frac{K_v K_0 K_m}{300s + 1} e^{-10s} = \frac{K}{300s + 1} e^{-10s}$$

则广义被控对象的有关参数为： $T=300\text{s}$ ； $\tau=10\text{s}$ ； $K = K_v K_0 K_m = 3$

采用动态特性参数法，按 Z-N公式 $KK'_c = 0.900(\tau / T)^{-1.000}$

计算等效控制器的等效比例增益，即 $K'_c = (0.9 / 3)(10 / 300)^{-1.000} = 9$

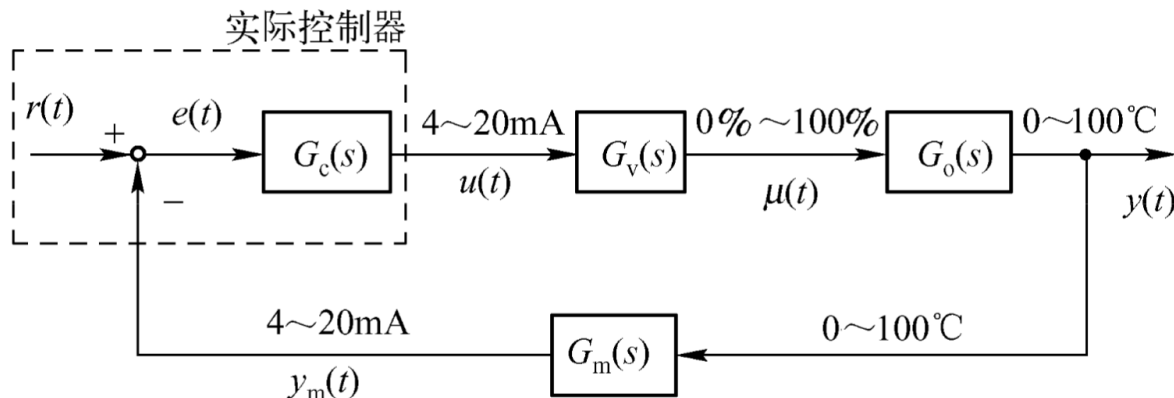
等效控制器仅由实际控制器本身组成，因此，上式就是控制器比例增益的实际值，即 $K_c = K'_c$ 。相应的比例带 $\delta = 1 / K_c = 1 / 9 = 11\%$

$$K_m = \frac{16}{100} (\text{mA} / ^\circ\text{C})$$

$$K_v = \frac{100}{16} (\% / \text{mA})$$

$$K_0 = 3 (^\circ\text{C} / \%)$$

$$G_0(s) = \frac{K_0}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s}$$



② 如广义被控对象不包括调节阀 $G_p(s) = G_0(s)G_m(s) = \frac{K_0 K_m}{300s + 1} e^{-10s} = \frac{K}{300s + 1} e^{-10s}$

则广义被控对象的有关参数为： $T=300\text{s}$ ； $\tau=10\text{s}$ ；

$$K = K_0 K_m = 3 \times 16 / 100 (\text{mA} / \%)$$

采用动态特性参数法，按 Z-N 公式 $KK'_c = 0.900(\tau / T)^{-1.000}$

计算等效控制器的等效比例增益，即 $K'_c = \frac{0.9 \times 100}{3 \times 16} (10 / 300)^{-1.000} = 900 / 16$

等效控制器由实际控制器和调节阀本身组成，因此， $K'_c = K_c K_v$

所以控制器比例增益的实际值，即 $K_c = \frac{K'_c}{K_v} = \frac{900 / 16}{100 / 16} = 9$

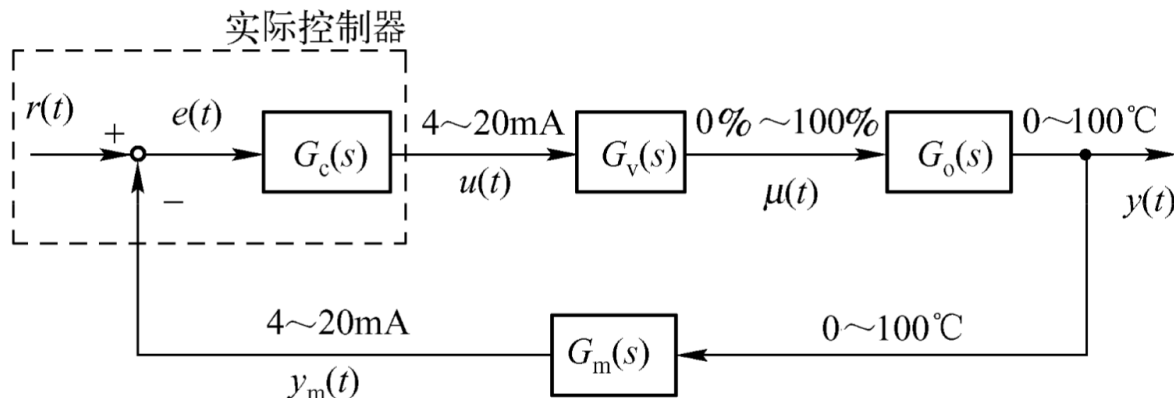
相应的比例带 $\delta = 1 / K_c = 1 / 9 = 11\%$

$$K_m = \frac{16}{100} (\text{mA} / ^\circ\text{C})$$

$$K_v = \frac{100}{16} (\% / \text{mA})$$

$$K_0 = 3 (^\circ\text{C} / \%)$$

$$G_0(s) = \frac{K_0}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s}$$



③ 如广义被控对象仅为被控对象本身 $G_p(s) = G_0(s) = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s} = \frac{K}{300s + 1} e^{-10s}$

则广义被控对象的有关参数为： $T=300\text{s}$ ； $\tau=10\text{s}$ ； $K = K_0 = 3 (^\circ\text{C} / \%)$

采用动态特性参数法，按 Z-N公式 $KK'_c = 0.900(\tau / T)^{-1.000}$

计算等效控制器的等效比例增益，即 $K'_c = (0.9 / 3)(10 / 300)^{-1.000} = 9$

等效控制器由控制器、调节阀和测量变送装置组成，因此， $K'_c = K_c K_v K_m$

所以控制器比例增益的实际值，即 $K_c = \frac{K'_c}{K_v K_m} = \frac{9}{1} = 9$

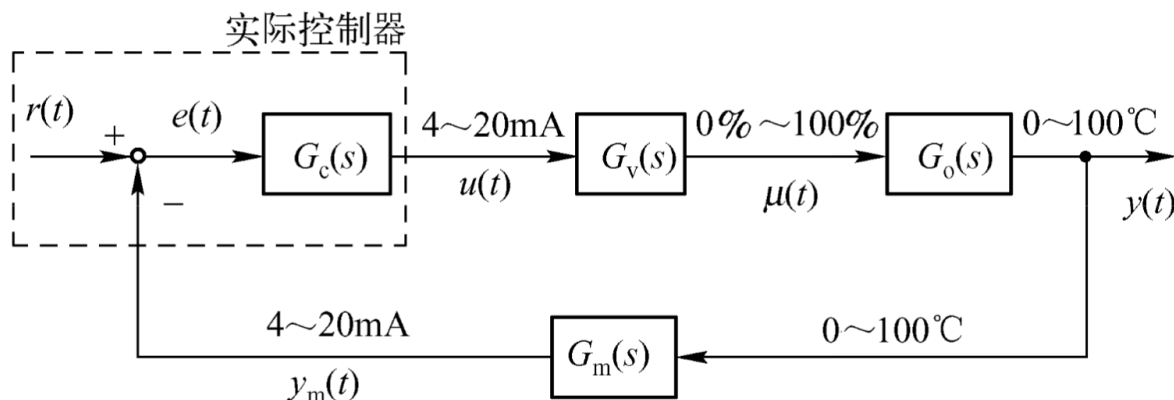
相应的比例带 $\delta = 1 / K_c = 1 / 9 = 11\%$

$$K_m = \frac{16}{100} (\text{mA} / ^\circ\text{C})$$

$$K_v = \frac{100}{16} (\% / \text{mA})$$

$$K_0 = 3 (^\circ\text{C} / \%)$$

$$G_0(s) = \frac{K_0}{T_s + 1} e^{-\tau s} = \frac{K_0}{300s + 1} e^{-10s}$$



(2) 确定控制器的积分时间

控制器积分时间 T_i 的实际值，由公式

$$T_i/T = 3.33(\tau/T)1.000$$

得

$$T_i = 3.33\tau = 3.33 \times 10 = 33.3\text{s}$$

(3) 确定控制器比例带和积分时间的刻度值

因为PID控制器为PI工作方式，故控制器参数的实际值就是它的刻度值。

数字PID参数的整定

- 数字PID控制器的参数整定可参考模拟控制器参数的整定方法，但在数字PID控制器参数的整定中多了一个采样周期 T 。
- 采样周期的选取应与PID参数的整定进行综合考虑。

采样周期的选择

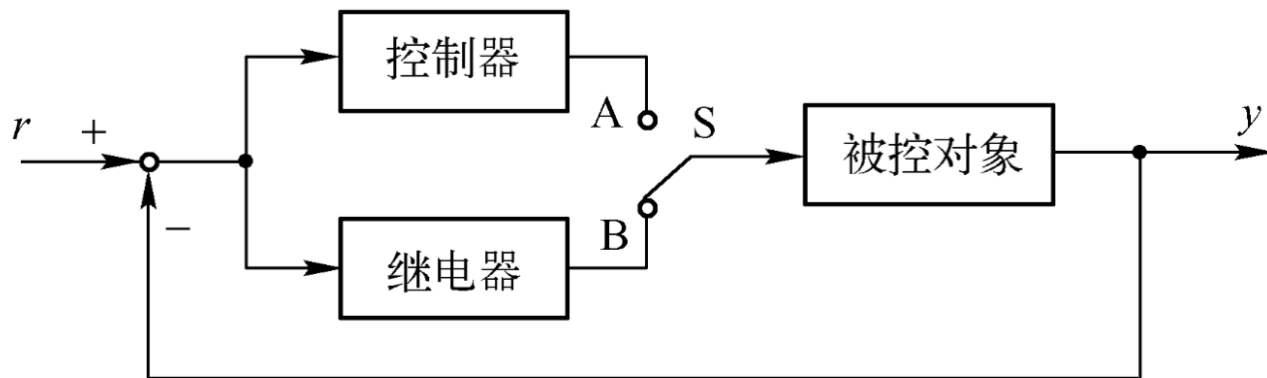
- 香农（Shannon）采样定律：为不失真地复现信号变化，采样频率至少应大于或等于连续信号最高频率分量的二倍。
- 根据采样定律可以确定采样周期的上限值，实际采样周期的选择还要受到多方面因素的影响，不同的系统采样周期应根据具体情况来选择。
- 通常按照过程特性与干扰大小适当来选取采样周期：
 - 对于响应快、（如流量、压力）波动大、易受干扰的过程，应选取较短的采样周期；
 - 当过程响应慢（如温度、成份）、滞后大时，可选取较长的采样周期。
- 采样周期应远小于过程的扰动信号的周期。
- 执行器的响应速度较慢时，过小的采样周期将失去意义，因此可适当选大一点。
- 在计算机运算速度允许的条件下，采样周期短，则控制品质好。
- 过程的纯滞后时间较长时，一般选取采样周期为纯滞后时间的 $1/4 \sim 1/8$ 。

PID控制器参数的自整定：基本概念

- 传统的PID控制器参数是采用**试验加试凑**的方法由人工整定。
- 这种整定工作不仅需要熟练的技巧，而且往往还相当费时。
- 更重要的是，当被控对象特性发生变化需要控制器参数作相应调整时，传统的PID控制器没有“**自适应**”能力，只能依靠人工重新整定参数。由于生产过程的连续性以及参数整定所需的时间，这种重新整定实际很难进行，甚至几乎是不可能的。
- 因此，多年来众多工程技术人员一直关注着**控制器参数自整定**的研究和开发。

PID控制器参数的自整定：方法

- **自校正控制器**需要相当多的被控对象的验前知识，特别是有关对象时间常数的数量级，以便选择合适的采样周期或数字滤波器的时间常数。
- 此外，参数估计器和调整机构均涉及大量计算，只有借助于计算机，该方法才能实现。
- 瑞典学者Astrom于1984年首先提出的**基于继电器型反馈的极限环法**，是一种常用的PID控制器的参数自整定方法。



第5章 简单控制系统

- 5.1 简单控制系统的分析
- 5.2 简单控制系统的设计
- 5.3 简单控制系统的参数整定
- **5.4 简单控制系统的投运**
- 5.5 简单控制系统的故障与处理
- 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

控制系统的投运

- 简单控制系统设计完成后，即可按设计要求进行正确安装。
- 控制系统按设计要求安装完毕，线路经过检查确实无误，所有仪表经过检查符合精度要求，并已运行正常，即可着手进行控制系统的投运。
- **控制系统的投运**，就是**将系统由手动工作状态切换到自动工作状态**。这一过程，是通过将控制器上的手动-自动切换开关从手动位置切换到自动位置来完成的。

控制器无扰切换技术

- 一般来说，不论数字还是模拟控制器，都存在着多种控制模式，例如手动、自动等。
- 在实际运行过程中，经常有必要在各控制模式间进行切换，同时要求此操作不会对调节过程带来大的冲击；在改变控制器参数时，具有同样的要求。
- 实现无扰切换的关键是**在切换前后，控制器输出值不会发生大的跳跃**
- **在自动/手动切换时，PID算法是否还要继续运算？**
- 在手动控制模式下，动态控制器的状态（如积分器状态、不完全微分项惯性环节的状态等）数值必须是明确的，否则将会导致由手动控制模式切换到自动控制模式时，控制器的输出值是不可预期的。

自动 (A) \Leftrightarrow 软手动 (M) \Leftrightarrow 硬手动 (H)

无扰切换算法

- 考虑在手动模式下（或在PID参数调整之前），PID控制器输出可写作：

$$u(t-) = u_P(t-) + u_I(t-) + u_D(t-)$$

- 在切换到自动（或参数修改）之后：

$$u(t+) = u_P(t+) + u_I(t+) + u_D(t+)$$

- 要实现无扰切换，必须满足： $u(t-) = u(t+)$

- 我们可以通过更新积分部分状态或微分状态来实现。

- 选择积分状态来实现，即有：

$$u_I(t+) = u_P(t-) + u_I(t-) + u_D(t-) - u_P(t+) - u_D(t+)$$

- 因此，在手动控制时， $u_I(kT)$ 要每周期由下式计算：

$$u_I(kT) = u_M(kT) - u_P(kT) - u_D(kT)$$

- 微分项采用不完全微分，其状态每周期同步更新。

投入运行前的准备工作

- 自动控制系统安装完毕或经过停车检修之后，都要（重新）投入运行。在投运每个控制系统前必须要进行全面细致的检查和准备工作。
- **投运前**，首先应熟悉工艺过程，了解主要工艺流程和对控制指标的要求，以及各种工艺参数之间的关系，熟悉控制方案，对测量元件、调节阀的位置、管线走向等都要做到心中有数。

系统的投运

- 合理、正确地掌握控制系统的投运，使系统无扰动地、迅速地进入闭环，是工艺过程平稳运行的必要条件。
- 对控制系统投运的唯一要求，是系统平稳地从手动操作转入自动控制，即按无扰动切换（指手、自动切换时阀上的信号基本不变）的要求将控制器投入自动控制。
- 控制系统的投运应与工艺过程的开车密切配合，在进行静态试车和动态试车的调试过程中，对控制系统和检测系统进行检查和调试。

系统的维护

- 控制系统和检测系统投运后，为保持系统长期稳定地运行，应做好系统维护工作。
- 定期和经常性的仪表维护。主要包括各种仪表的定期检查和校验，要做好记录和归档工作；要做好连接管线的维护工作，对隔离液等应定期灌注。
- 发生故障时的维护。一旦发生故障，应及时、迅速、正确地分析和处理；应减少故障造成的影响；事后要进行分析；应找到第一事故原因并提出改进和整改方案；要落实整改措施并做好归档工作。

第5章 简单控制系统

- 5.1 简单控制系统的分析
- 5.2 简单控制系统的设计
- 5.3 简单控制系统的参数整定
- 5.4 简单控制系统的投运
- **5.5 简单控制系统的故障与处理**
- 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

控制系统的故障与处理

- 过程控制系统是工业生产正常运行的保障。
- 一个设计合理的控制系统，如果在安装和使用维护中稍有闪失，便会造成因仪表故障停车带来的重大经济损失。
- **正确分析判断、及时处理系统和仪表故障**，不但关系到生产的安全和稳定，还涉及产品质量和能耗，而且也反映出自控人员的工作能力及业务水平。
- 因此，在生产过程的自动控制中，仪表维护、维修人员除需掌握基本的控制原理和控制工程基础理论外，更需熟练地掌握控制系统维护的操作技能，并在工作中逐步积累一定的**现场实际经验**，这样才能具有判断和处理现场中出现的千变万化的故障的能力。

故障产生的原因

- 过程控制系统在线运行时，如果不能满足质量指标的要求，或者指示记录仪表上的数值偏离质量指标的要求，说明方案设计合理的控制系统存在故障，需要及时处理，排除故障。
- 一般来说，开工初期或停车阶段，由于工艺生产过程不正常、不稳定，各类故障较多。当然，这种故障不一定都出自控制系统和仪表本身，也可能来自工艺部分。
- 自动控制系统的故障是一个较为复杂的问题，涉及面也较广，自动化工作人员要按照故障现象、分析和判断故障产生的原因，并采取相应的措施进行故障处理。

故障的判断和处理

- 仪表故障分析是一线维护人员经常遇到的工作。分析故障前要做到“两了解”：
 - 一应比较透彻地了解**控制系统的设计意图、结构特点、施工、安装、仪表精度、控制器参数要求**等；
 - 二应了解**有关工艺生产过程的情况及其特殊条件**，这对分析系统故障是极有帮助。
- 在分析和检查故障前，应首先向当班操作工了解情况，包括处理量、操作条件、原料等是否改变，再结合记录曲线进行分析，以确定故障产生的原因，尽快排除故障。

亲身经历石油化工企业的事故与反思

<http://blog.sciencenet.cn/blog-254303-880542.html>

<http://blog.sciencenet.cn/blog-732399-1169646.html>

自动化的迷思

第5章 简单控制系统

- 5.1 简单控制系统的分析
- 5.2 简单控制系统的设计
- 5.3 简单控制系统的参数整定
- 5.4 简单控制系统的投运
- 5.5 简单控制系统的故障与处理
- 5.6 利用MATLAB对简单控制系统进行仿真

本章小结

- 在简单控制系统分析和设计时，通常将系统中控制器以外的部分组合在一起，即**被控对象、执行器和检测变送仪表合并为广义被控对象**。
- 如果广义被控对象的传递函数可用一阶惯性加纯迟延近似，则可根据广义被控对象的**可控比**选择PID控制器的调节规律。
- 为了保证构成工业过程中的控制系统是一种**负反馈控制**，系统的开环增益必须为负，而系统的开环增益是系统中各环节增益的乘积。
- 控制器的正作用方式是指实际控制器的输出信号 u 随着被控变量 y 的增大而增大，此时称实际控制器的增益为正，取的‘+’号。反之为反作用方式，取‘-’号。
- 过程控制系统中的实际PID控制器是由信号比较机构和运算环节两部分组成的。**实际PID控制器的增益 $=(-1) \times$ 控制器运算环节的增益**
- 系统整定方法可归纳为两大类：理论计算法和工程整定法，工程实际应用中常采用工程整定法，有动态特性参数法、稳定边界法、衰减曲线法和经验整定法。
- PID控制器参数的整定，不论采用理论计算方法还是工程整定法中的动态特性参数法，都是以由广义被控对象和等效控制器两部分组成的控制系统为基础的。等效控制器和广义被控对象之间如何划分会直接影响实际控制器参数与等效控制器参数之间的关系。
- 对于工业PID控制器来说，由于**各参数之间存在相互干扰**，必须考虑控制器各参数实际值与刻度值之间的转换关系。
- PID控制器参数的自整定多年来一直是众多工程技术人员重点研究的内容。