



南開大學  
Nankai University

# 《过程控制系统》

## 第6章 串级控制系统

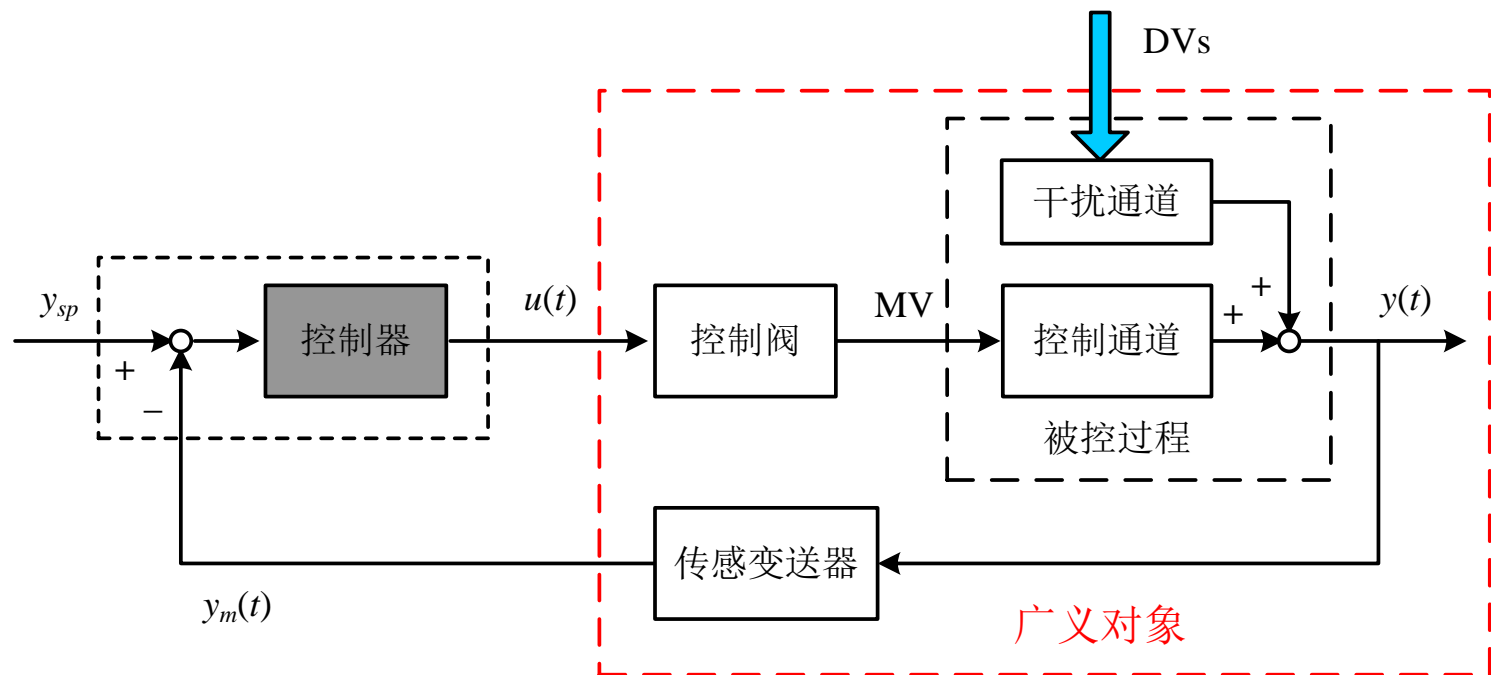
于宁波

南开大学人工智能学院

# 第6章 串级控制系统

- 6.1 串级控制系统的基本概念
- 6.2 串级控制系统的分析
- 6.3 串级控制系统的设计
- 6.4 串级控制系统的整定
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真

# 单回路控制系统



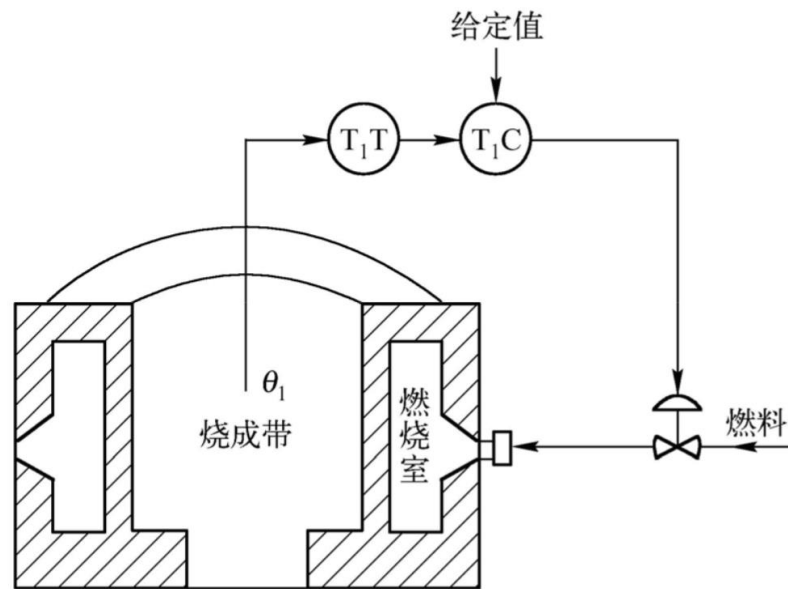
- 结构最简单的闭环控制系统
- 系统只用了一个调节器（控制阀），调节器也只有一个输入信号。
- 从系统框图看，只有一个闭环。

# 复杂控制系统

- 系统有**多个回路**:
  - 由多个测量值、多个调节器，组成多个回路；
  - 由多个测量值、一个调节器、一个补偿器或一个解耦器等，组成多个回路。
- 从系统框图看，有多个**闭环**。

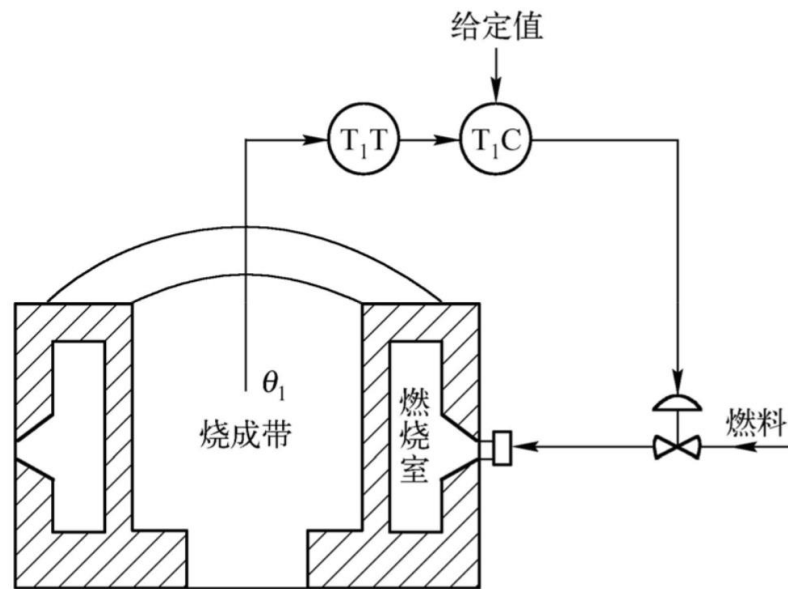
# 隔焰式隧道窑的烧成带温度控制

- 隔焰式隧道窑，是对陶瓷制品进行预热、烧成、冷却的装置，如图6-1所示。
- 若火焰直接在窑道烧成带燃烧，燃烧气体中的有害物质会影响产品的光泽和颜色。
- 所以就出现了**隔焰式隧道窑**。火焰在燃烧室中燃烧，热量经隔焰板辐射加热烧成带。

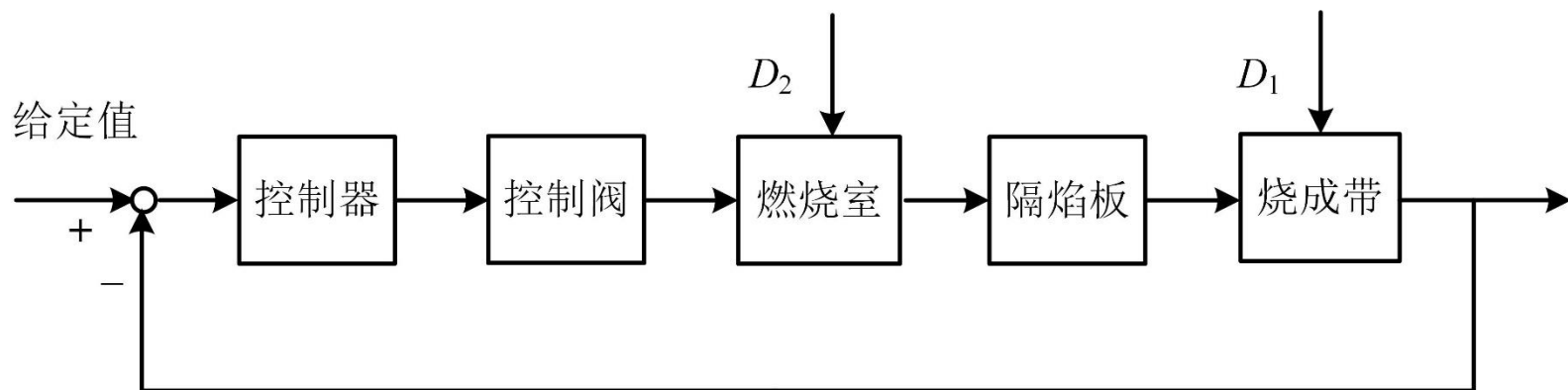


# 烧成带温度控制系统的工艺流程

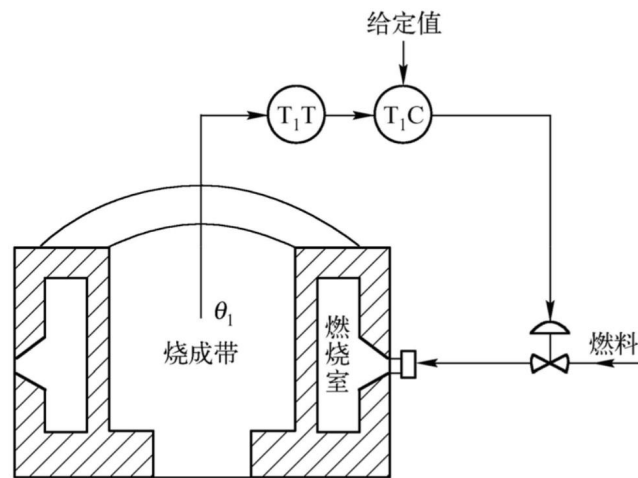
- 制品在窑道烧成带内按工艺规定的温度进行烧结，烧结温度一般为 $1300^{\circ}\text{C}$ ，偏差不得超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。
- 所以，烧成带的烧结温度是影响产品质量的重要控制指标之一。
- 因此：
  - 将烧成带的温度作为被控变量；
  - 将燃料流量作为操纵变量。



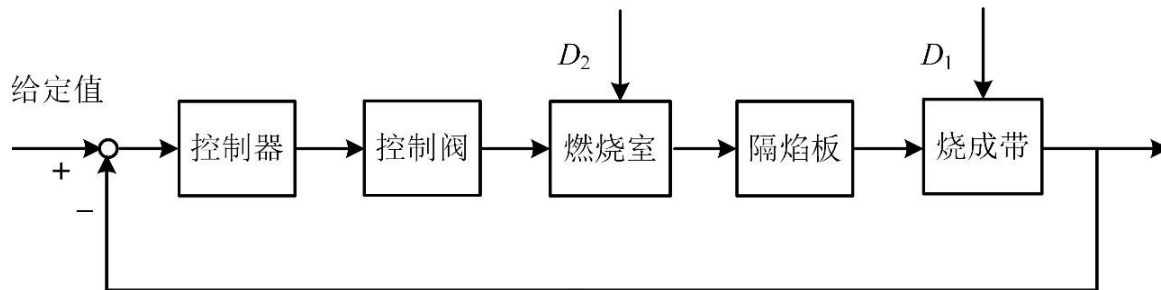
# 烧成带温度简单控制系统的原理方框图



- 按照前面学过的**简单控制系统**，影响烧成带温度 $\theta_1$ 的各种干扰因素都被包括在控制回路当中，只要干扰造成 $\theta_1$ 偏离设定值，控制器就会根据偏差的情况，通过控制阀改变燃料的流量，从而把变化了的 $\theta_1$ 重新调回到设定值。



# 存在的问题

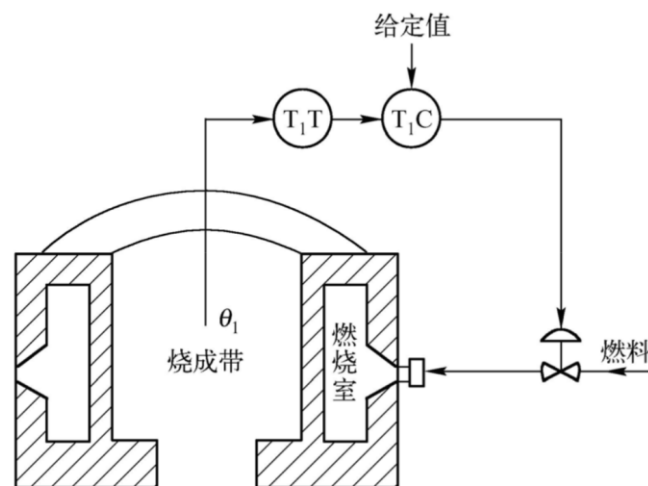


- 但是，在这个系统中，从控制阀到窑道烧成带**滞后时间太大**：
- 如果燃料的压力发生波动，尽管控制阀门开度没变，但燃料流量将发生变化，必将引起燃烧室温度波动，再经隔焰板传热、辐射，引起烧成带温度的变化。
  - 因为只有烧成带温度出现偏差时，才能发现干扰的存在，所以对于燃料压力的干扰不能够及时发现。
  - 烧成带温度出现偏差后，控制器根据偏差性质立即改变控制阀的开度，改变燃料流量，对烧成带温度加以调节。可是这个调节作用同样要经历燃烧室的燃烧、隔焰板的传热以及烧成带温度的变化这个时间滞后很长的通道。因此，当调节过程起作用时，烧成带的温度已偏离设定值很远了。
  - 即使发现了偏差，也不能得到及时调节，造成超调量增大，稳定性下降。
  - 如果燃料压力干扰频繁出现，对于单回路控制系统，不论控制器采用PID的什么控制作用，还是参数如何整定，都得不到满意的控制效果。

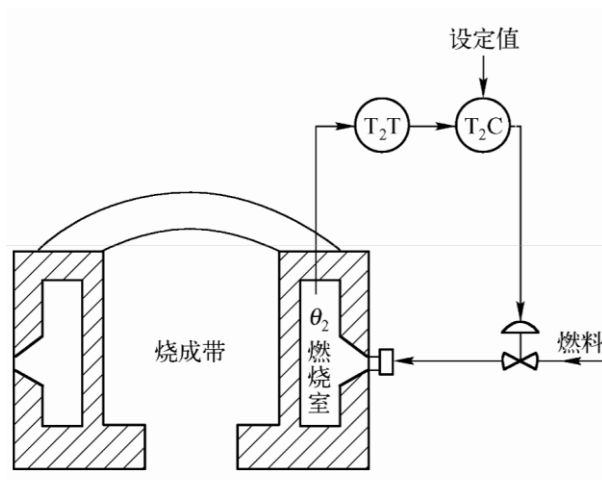


# 通过控制燃烧室温度来抑制干扰

- 假定燃料的压力波动是**主要干扰**，发现它到燃烧室的滞后时间较小、通道较短，而且还有一些其他的**次要干扰**，如燃料热值的变化、助燃风流量的改变、排烟机抽力的波动等（图中用 $D_2$ 表示），都是首先进入燃烧室。
- 能否**通过控制燃烧室温度 $\theta_2$ 的方法来达到稳定烧成带的温度 $\theta_1$** ？
- 图6-3所示的以燃烧室温度 $\theta_2$ 为被控变量的单回路控制系统。



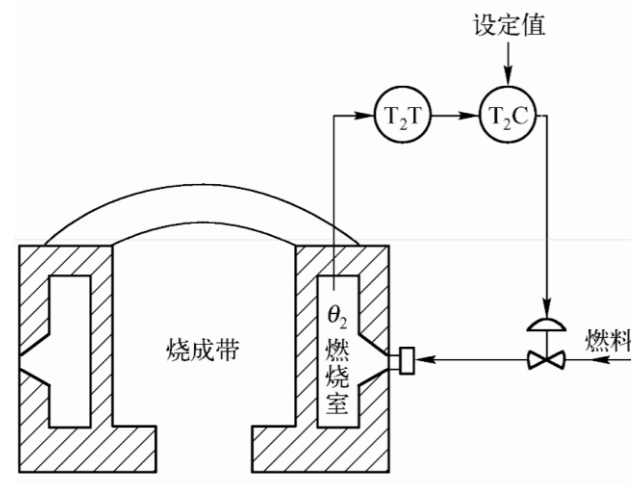
烧成带温度简单控制系统



燃烧室温度控制系统

# 优点和不足

- 这种控制系统，对前述 $D_2$ 干扰**有很强的抑制作用**，不等影响到烧成带温度，就被较早发现，及时进行控制，将它们对烧成带温度的影响降低到最小限度。

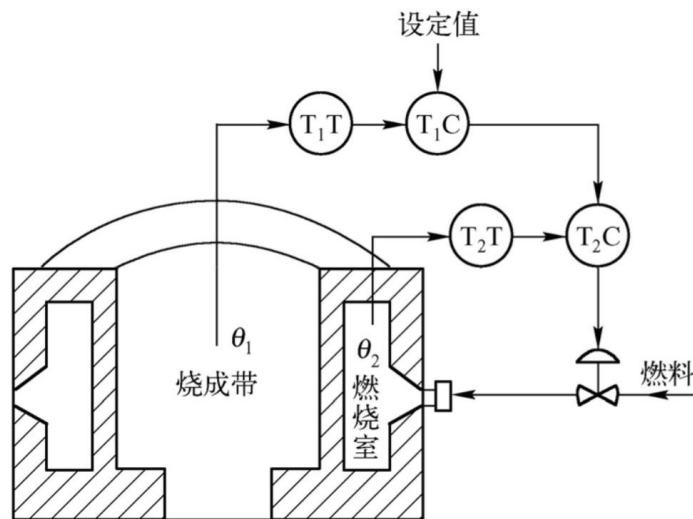


燃烧室温度控制系统

- 但是，还有**直接影响烧成带温度的干扰**（用 $D_1$ 表示），例如：
  - 窑道中装载制品的窑车速度；
  - 制品的原料成分；
  - 窑车上装载制品的数量；
  - 春夏秋冬刮风下雨带来环境温度的变化等等。
- 由于在这个控制系统中，**烧成带温度不是被控变量**，所以**对于 $D_1$ 干扰所造成的烧成带温度变化，控制系统无法进行调节**。

# 两种控制系统的综合

- 比较前述两个控制系统，它们各有自己的长处：
  - 第一种控制系统包括了所有干扰；
  - 第二种控制系统能对主要和一些次要的干扰提前发现，及早控制。



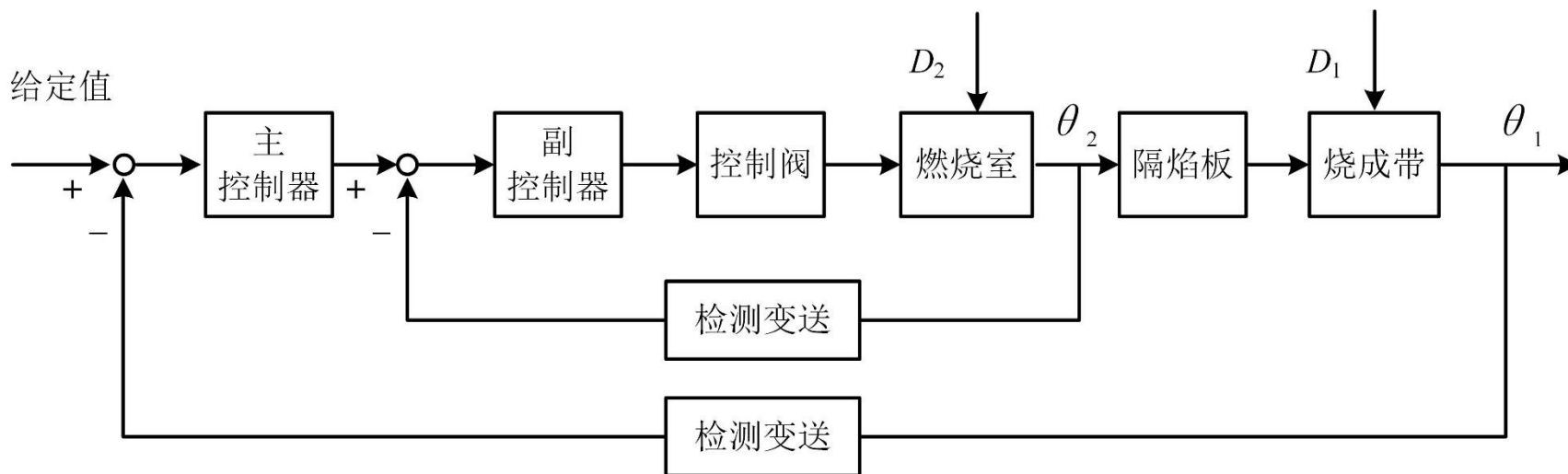
隔焰式隧道窑温度-温度串级控制系统图

- 能否将两个控制系统结合起来，发挥各自优势，两全其美？
- 控制燃烧室温度 $\theta_2$ 的真正目的是控制烧成带温度 $\theta_1$ 稳定不变：
  - 烧成带温度控制器应该是定值控制，起主导作用；
  - 燃烧室温度控制器则起辅助作用，它在克服干扰 $D_2$ 的同时，应该受烧成带温度控制器的操纵，操纵方法就是烧成带温度控制器的输出作为燃烧室温度控制器的设定值。

# 串级控制系统

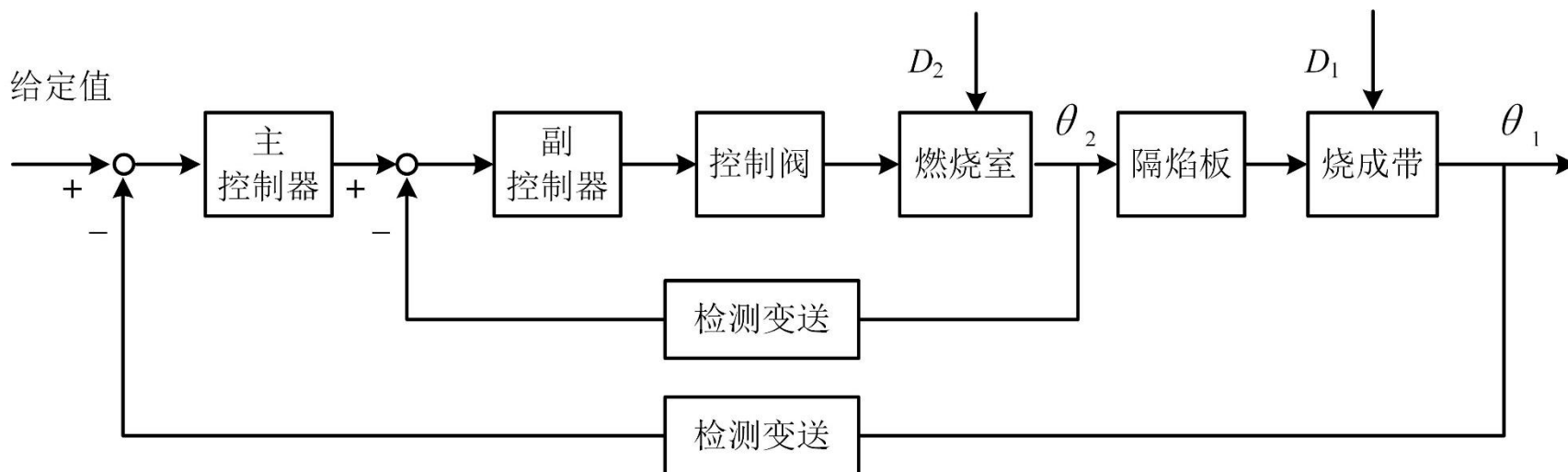
➤ 所谓串级控制系统，就是采用**两个控制器串联工作**：

- **主控制器**的输出作为副控制器的设定值，
- **副控制器**的输出去操纵控制阀，
- 实现对主被控变量具有**更好的控制效果**。



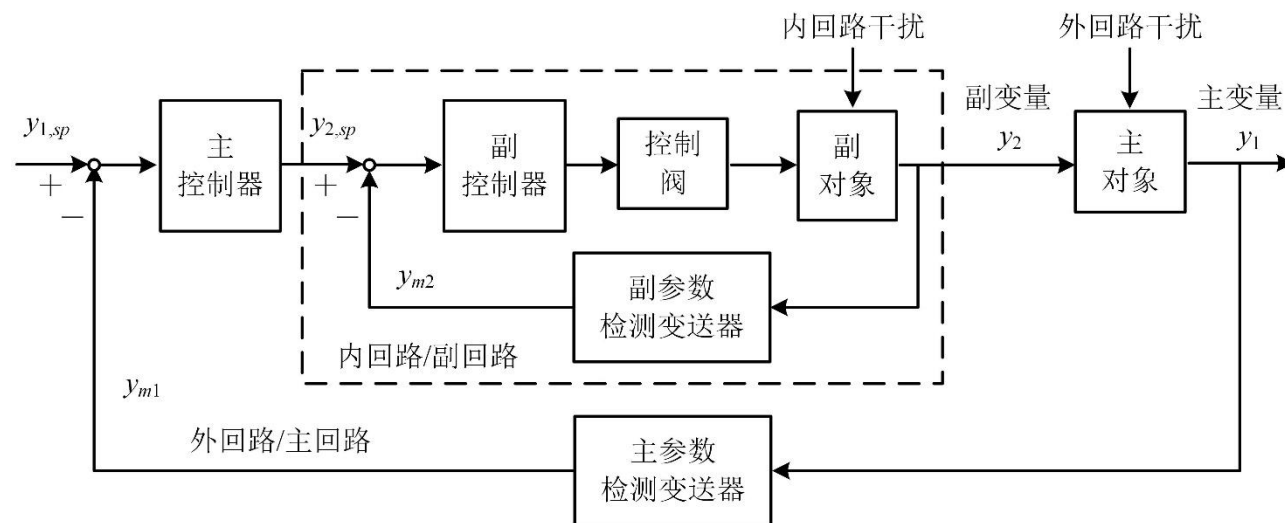
# 串级控制系统

- 可以看到，串级系统和简单系统有一个显著的区别，在结构上形成了两个闭环：
  - 一个闭环在里面，称为**副环或者副回路**，在控制过程中起“**粗调**”的作用；
  - 一个闭环在外面，称为**主环或主回路**，用来完成“**细调**”的任务，以最终保证被调量满足工艺要求。
- 无论主环或副环都有各自的调节对象、测量变送元件和调节器。



# 串级控制系统的组成

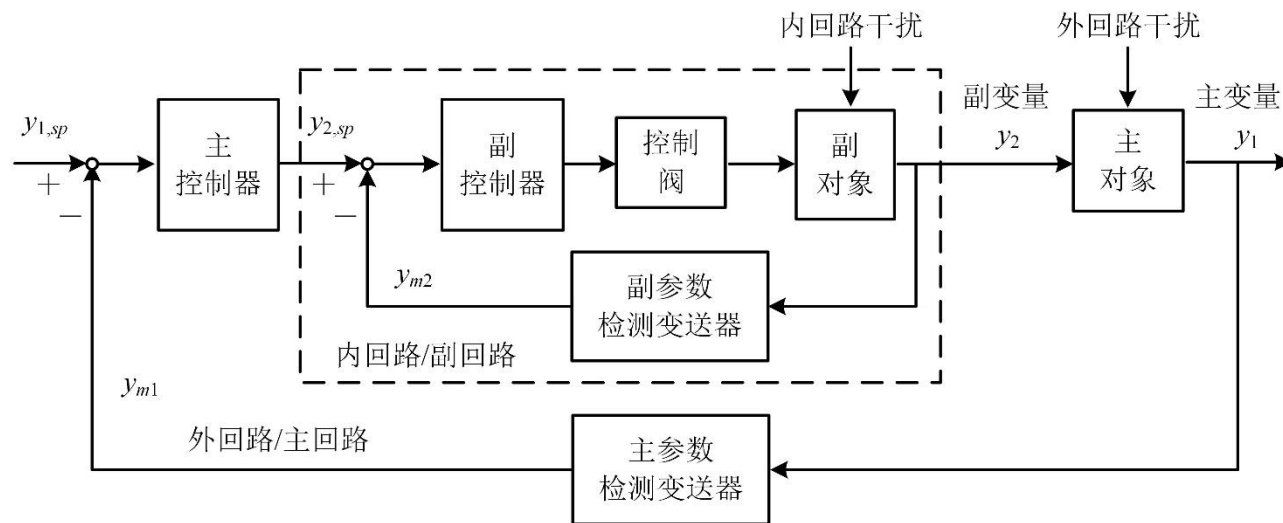
串级控制系统的标准方框图



- **主、副回路** 在外面的闭合回路，称为主回路（主环）；在里面的闭合回路，称为副回路（副环）。
- **主、副控制器** 处于主回路中的控制器，称为主控制器；处于副回路中的控制器，称为副控制器。
- **主/副被控变量** 主回路的被控变量，称为主被控变量（主变量或主参数）；副回路的被控变量，称为副被控变量（副变量或副参数）。
- **主、副对象** 主回路所包括的对象，称为主对象；副回路所包括的对象，称为副对象。
- **主、副检测变送器** 检测和变送主变量的称为主检测变送器；检测和变送副变量的称为副检测变送器。
- 进入主回路的干扰称为**外回路干扰**；进入副回路的干扰称为**内回路干扰**。

# 串级控制系统的组成

串级控制系统的标准方框图



- 系统中的两个调节器，它们的作用各不相同：
  - **主调节器**具有自己独立的设定值，它的输出作为副调节器的设定值；
  - **副调节器**的输出信号送到调节阀去控制生产过程。
- 比较串级系统和简单系统，前者只比后者多了一个测量变送元件和一个调节器，增加的仪表投资并不多，但**控制效果却有显著的提高**。

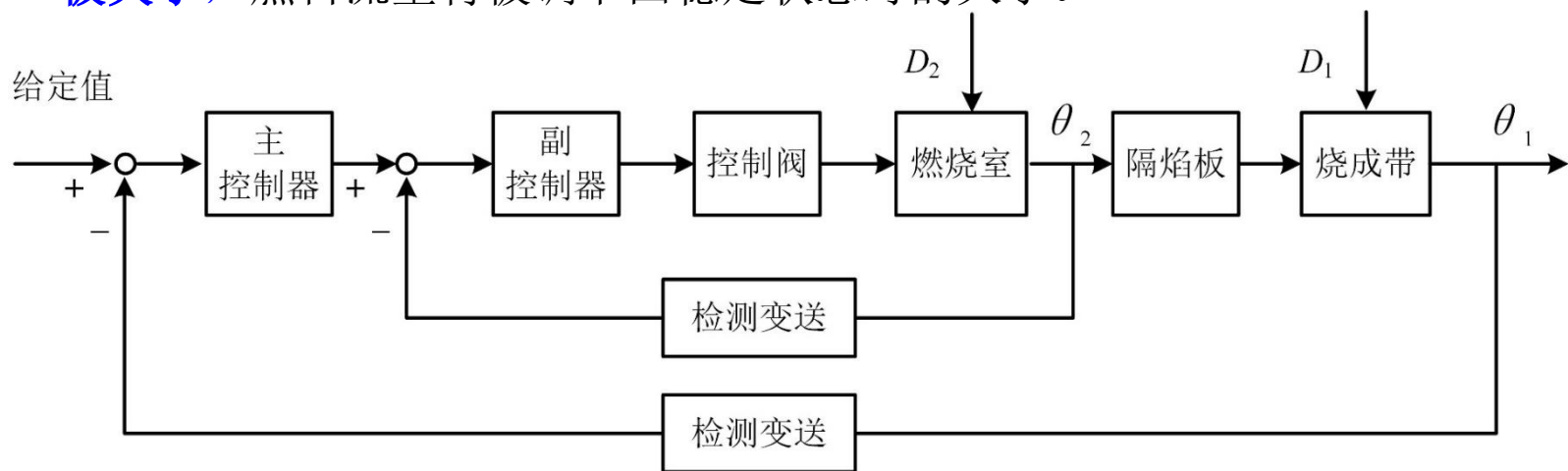
# 串级控制系统的工作过程

- 串级控制系统是由两个控制器串联工作的，只有副控制器的输出去操纵控制阀。
- 两个控制器能否协调一致地工作，**会不会发生矛盾？**
- 仍以隔焰式隧道窑温度串级控制系统为例来：
  - 考虑到生产的安全，控制阀选择“气开”工作方式。两个控制器都选择“反”作用方式（负反馈）。
  - 考虑以下从三种情况进行讨论：
    - **只存在内回路干扰**
    - **只存在外回路干扰**
    - **外回路干扰和内回路干扰同时存在**



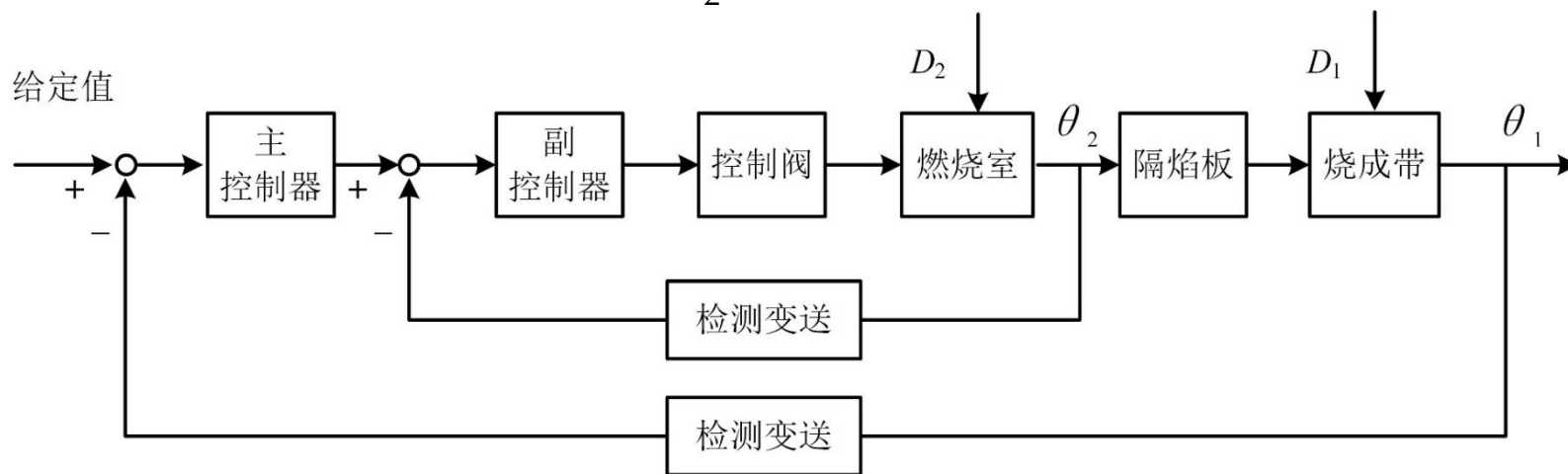
# 串级控制系统：只存在内回路干扰

- 假定系统只受到来自燃料压力波动的干扰：
  - 由于它进入副回路，所以属于内回路干扰 $D_2$ 。
- 例如整个系统处于稳定状态下，突然燃料压力升高：
  - 这时，控制阀门开度没变，燃料的流量增大，将引起燃烧室温度 $\theta_2$ 升高；
  - 经副温度检测变送器后，副控制器接受的测量值增大；
  - 由于燃料流量的变化并不能立即引起烧成带温度的变化，所以在这一时刻，主控制器的输出暂时还没有变化，因此副控制器处于定值控制状态；
  - 根据副控制器的“反”作用，其输出将减小，“气开”式控制阀的阀门将被关小，燃料流量将被调节回稳定状态时的大小。



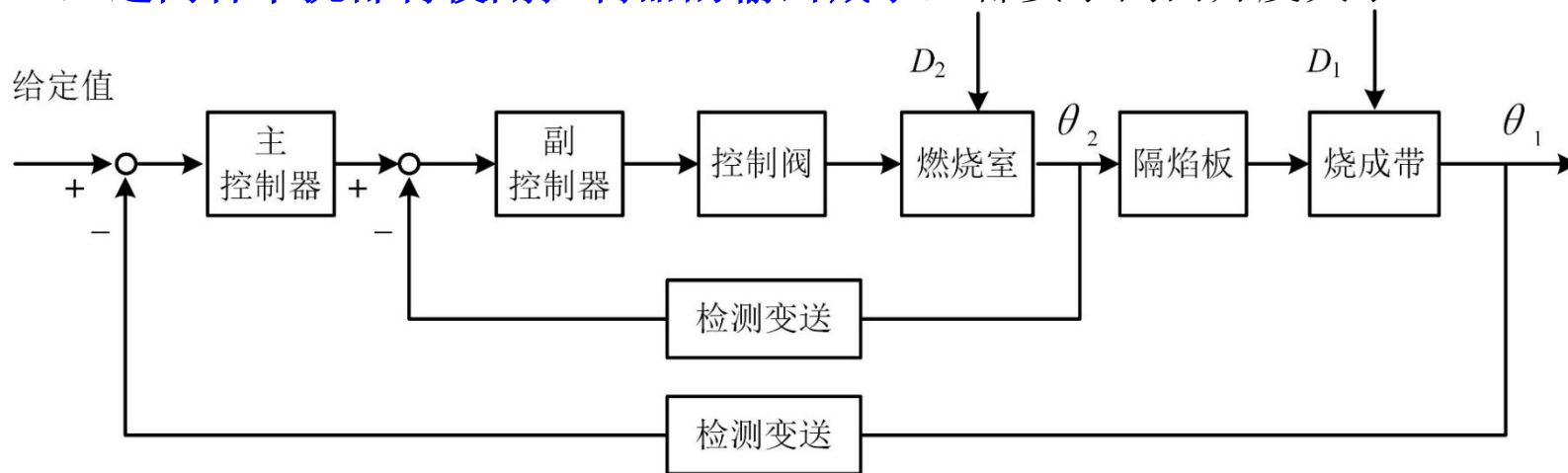
# 串级控制系统：只存在外回路干扰

- 假定串级控制系统只受到来自窑车速度的干扰，例如窑车的速度加快：
- 导致窑道中**烧成带温度 $\theta_1$** 降低；
  - 对于定值控制的主控制器来说，其测量值减小，由于主控制器的“反”作用，它的输出必然增大，**副控制器的设定值增大**；
  - 因为窑车的速度属于**外回路干扰**，它对**副变量（燃烧室温度 $\theta_2$ ）**没有影响，所以这时**副控制器的测量值暂时还没有改变**。
  - 对副控制器，设定值增大、测量值没变，可**等效为设定值不变、测量值减小**。
  - 根据副控制器的“反”作用，其输出将增大，“气开”式**控制阀开度增大**，加大燃料流量，使燃烧室温度 $\theta_2$ 升高，进而使窑道烧成带温度回升至设定值。



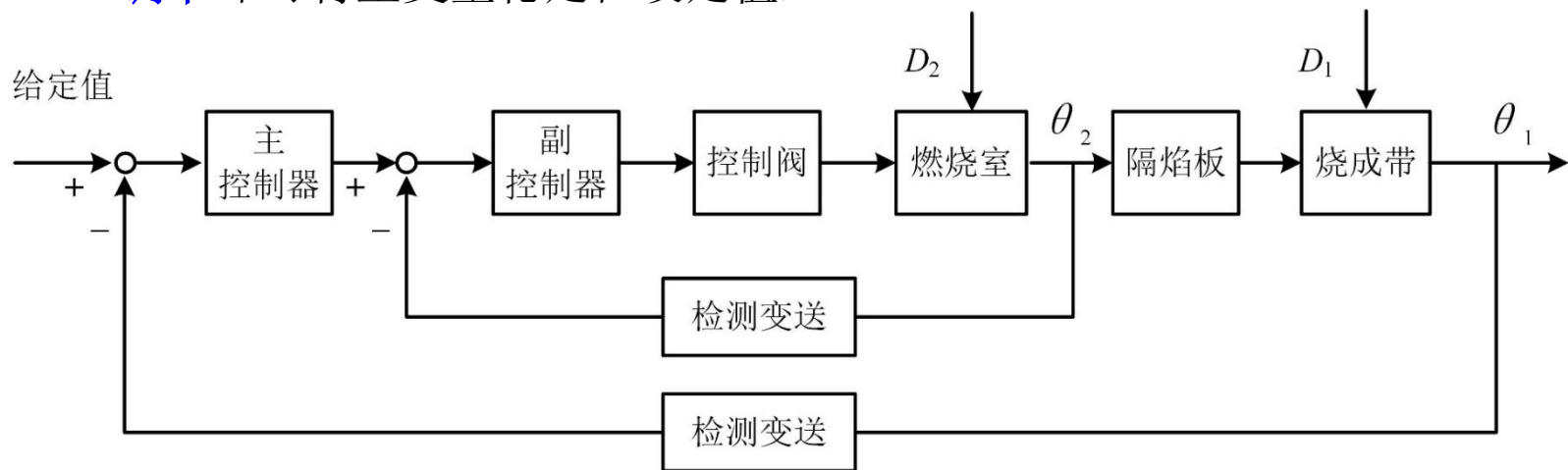
# 串级控制系统：外、内回路干扰同时存在 -- 1

- 外、内回路干扰引起主、副变量同方向变化，同时增大或减小。假定
- 外回路干扰为窑车的前进速度减小，将引起主变量（烧成带温度） $\theta_1$  升高；
  - 内回路干扰为燃料压力增大，导致副变量（燃烧室温度） $\theta_2$  也升高。
  - 对于主控制器，测量值升高，输出将在稳态时的基础上减小，亦即副控制器的设定值将减小；
  - 对于副控制器，测量值增大，输出的变化应根据设定值和测量值的变化方向共同决定。不妨将设定值的变化等效为设定值不变而测量值的变化，设定值减小可以等效为设定值不变而测量值增大。
  - 上述两种干扰都将使副控制器的输出减小，都要求阀门开度关小。



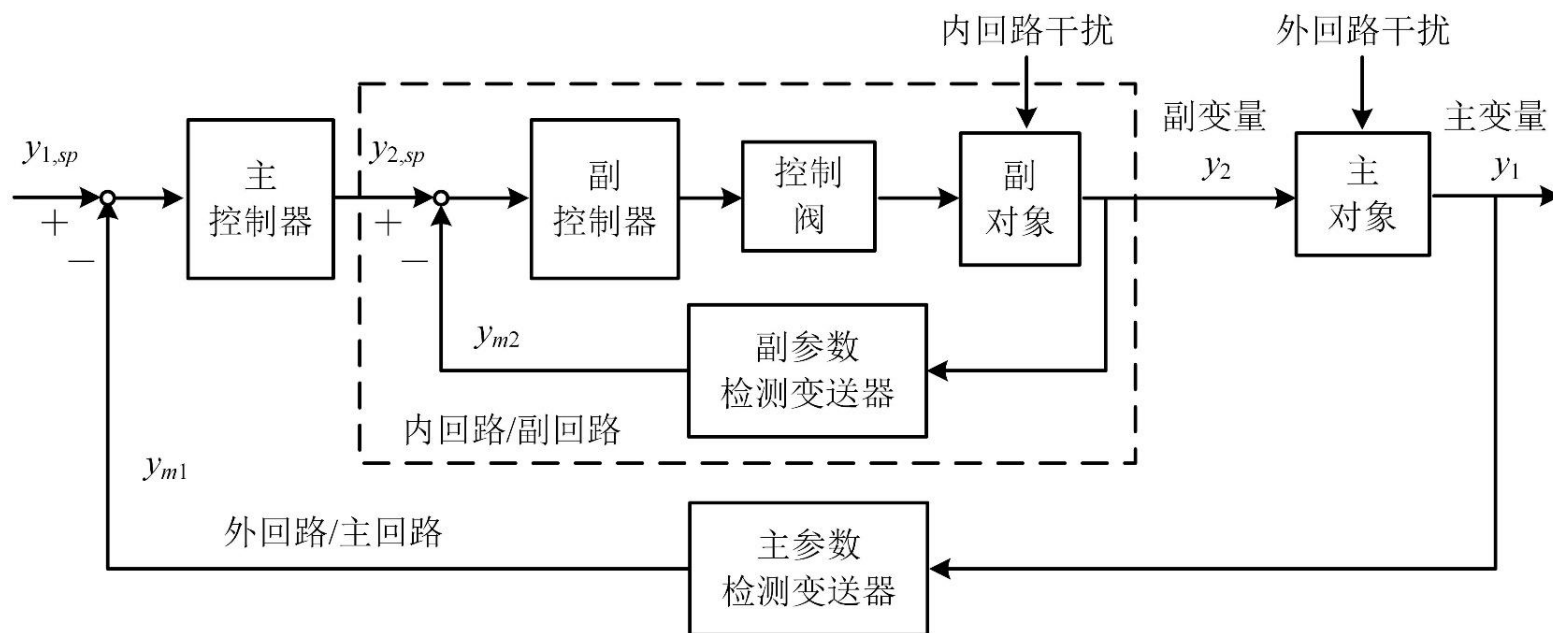
# 串级控制系统：外、内回路干扰同时存在 -- 2

- 外、内回路干扰引起主、副变量反方向变化，一个增大而另一个减小。假定：
- 外回路干扰为窑车前进速度增大，引起主变量（烧成带温度） $\theta_1$ 下降；
  - 内回路干扰为燃料压力增大，导致副变量（燃烧室温度） $\theta_2$ 升高；
  - 对于主控制器，测量值减小，输出将增大，也将使副控制器的设定值增大；
  - 对于副控制器，测量值增大，设定值也增大
    - 如果它们同步增大，幅度相同，副控制器的输入信号--偏差，没有改变，控制器的输出当然也就不变，控制阀开度不变。实际上就是用内回路干扰补偿了外回路干扰，阀门无需调节；
    - 如果两个干扰引起副控制器的设定值和测量值的同向变化不相同，内回路干扰不足以补偿外回路干扰时，副控制器根据偏差的性质作小范围的调节即可将主变量稳定在设定值上。



# 串级控制系统

- 从串级控制系统的工作过程可以看出，以保证主变量稳定为目的，以主控制器为主导，**两个控制器串联工作，协调一致，互相配合。**
- 尤其对于内回路干扰，副控制器首先进行“粗调”，主控制器再进一步“细调”。因此，**控制质量必然高于简单控制系统。**



# 第6章 串级控制系统

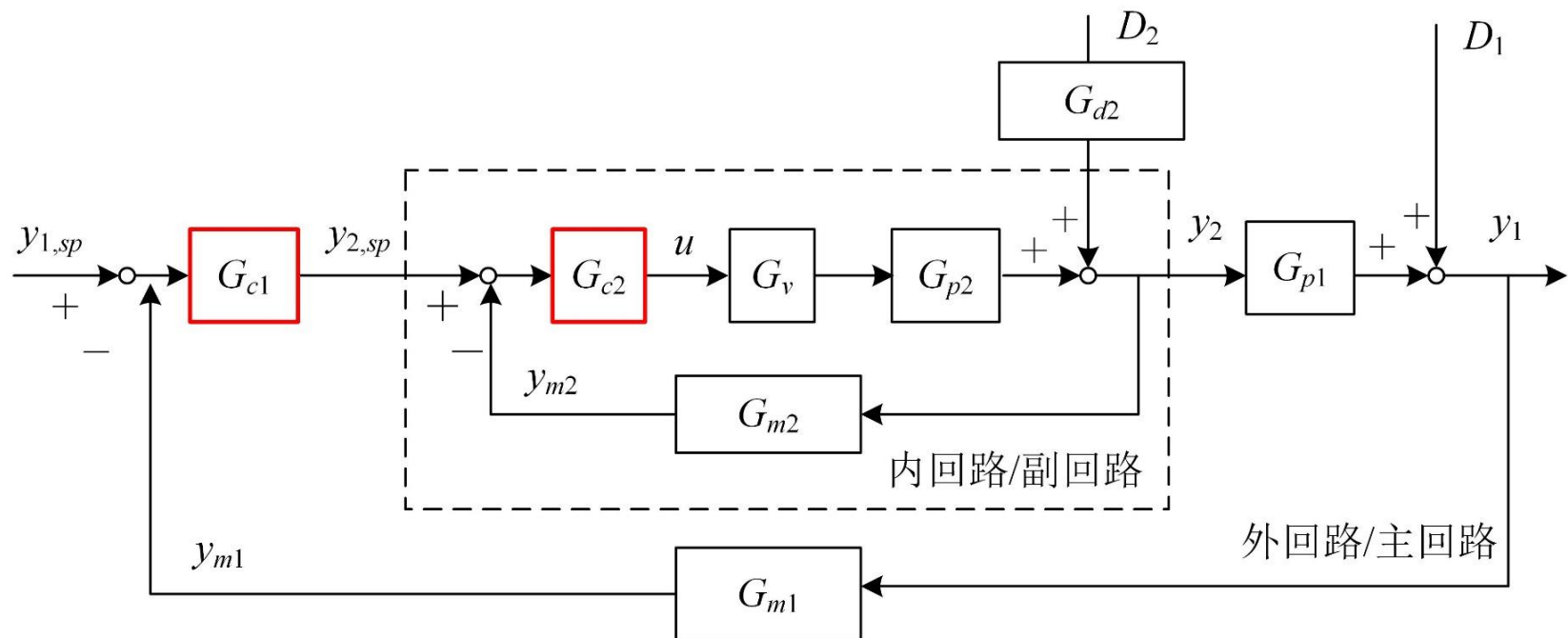
- 6.1 串级控制系统的基本概念
- **6.2 串级控制系统的分析**
- 6.3 串级控制系统的设计
- 6.4 串级控制系统的整定
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真

# 串级控制系统的分析

- 串级控制系统，相比于简单控制系统，虽然只是在结构上增加了一个副回路，但是可以为系统带来诸多优势：
  - 增强系统的抗干扰能力；
  - 改善对象的动态特性，提高系统的工作频率；
  - 对负荷或操作条件的变化有一定自适应能力。

# 传递函数形式的串级控制系统方块图

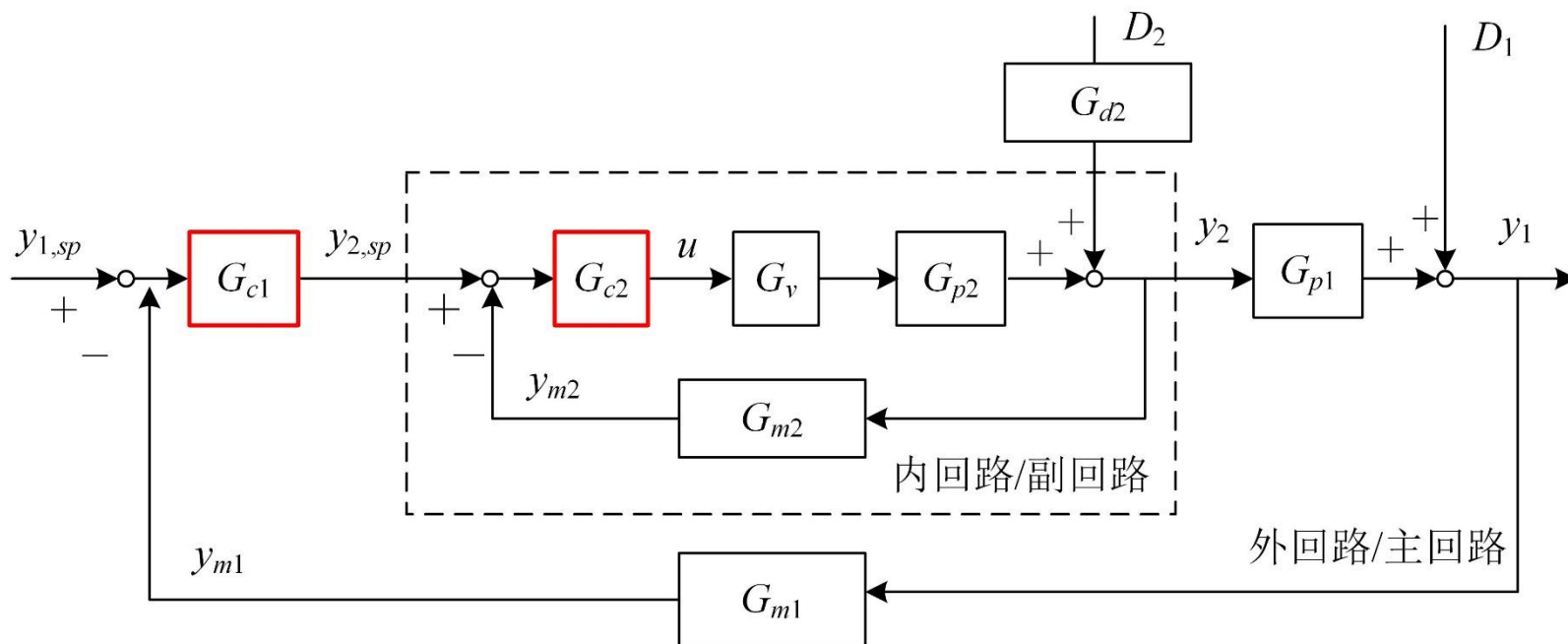
- $D_1$  反映了各种外回路干扰对主参数的综合影响；
- $D_2$  反映了各种内回路干扰对副参数的综合影响。
- 串级控制系统的副环具有快速作用，能有效地克服内回路扰动的影响。可以说，串级系统主要是用来克服进入副回路的内回路干扰。



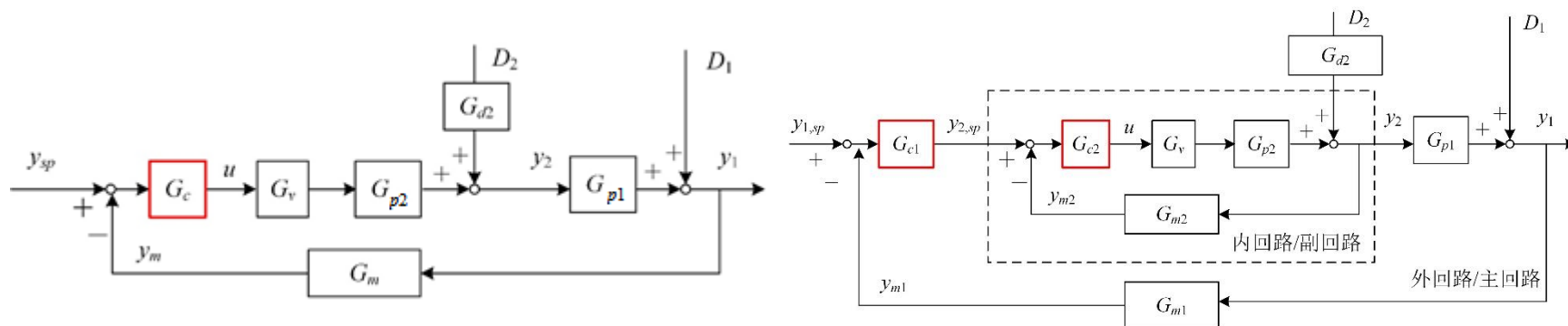


# 抗干扰能力增强：内回路

- 当内回路干扰 $D_2$ 经过干扰通道环节 $G_{d2}(s)$ 之后，进入副回路，首先影响副参数 $y_2$ ，于是副调节器立即动作，力图消弱干扰对 $y_2$ 的影响。
- 显然，干扰经过副环的抑制后再进入主环，对 $y_1$ 的影响将有较大的减弱。



# 抗干扰能力增强：内回路



左图简单控制系统和右图串级控制系统中，干扰 $D_2$ 至 $y_1$ 的传递函数分别为：

$$\left. \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} \right|_{\text{单}} = \frac{G_{d2}(s)G_{p1}(s)}{1 + G_c(s)G_v(s)G_{p1}(s)G_{p2}(s)G_m(s)}$$

$$\left. \frac{Y_1(s)}{D_2(s)} \right|_{\text{串}} = \frac{\frac{G_{d2}(s)G_{p1}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)}}{1 + G_{c1}(s)G_{m1}(s)G_{p1}(s)} \cdot \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)}}$$

$$= \frac{G_{d2}(s)G_{p1}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s) + G_{c1}(s)G_{m1}(s)G_{p1}(s)G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)}}$$

# 抗干扰能力增强：内回路

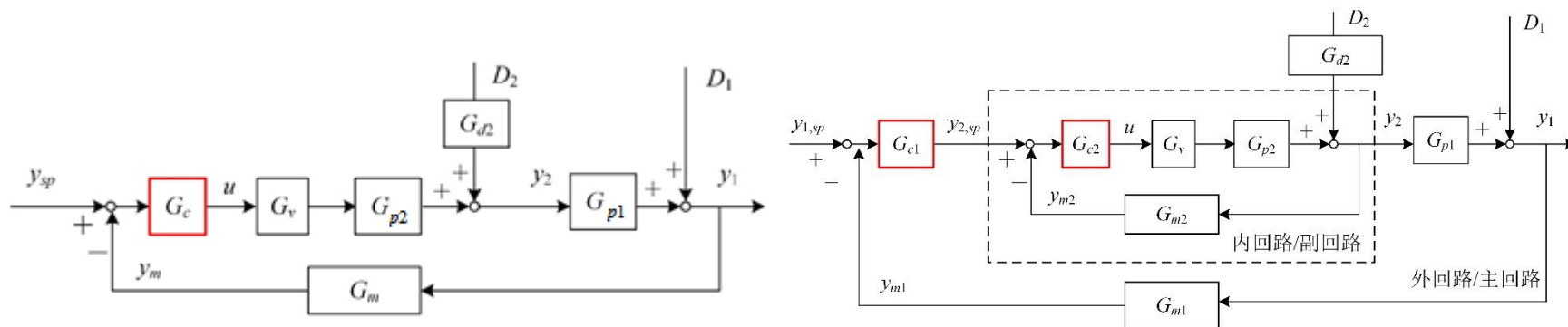
- 先假定  $G_c(s)=G_{c1}(s)$ ，且注意到单回路系统中的  $G_m(s)$  就是串级系统中的  $G_{m1}(s)$ ，可以看到，串级中  $Y_1(s) / D_2(s)$  的分母中多了一项，即：

$$G_{c2}(s) G_v(s) G_{p2}(s) G_{m2}(s)$$

在主环工作频率下，这项乘积的数值一般是比较大的，而且随着副调节器比例增益的增大而加大；

- 另外，串级系统中分母第三项比单回路系统分母中第二项多了一个  $G_{c2}(s)$ 。一般情况下，副调节器的比例增益是大于 1 的。
- 因此可以说，串级控制系统的结构使二次干扰  $D_2$  对主参数  $y_1$  这一通道的动态增益明显减小。当二次干扰出现时，很快就被副调节器所克服。
- 与单回路控制系统相比，被调量受二次干扰的影响往往可以减小 10~100 倍，这要视主环与副环中容积分布情况而定。

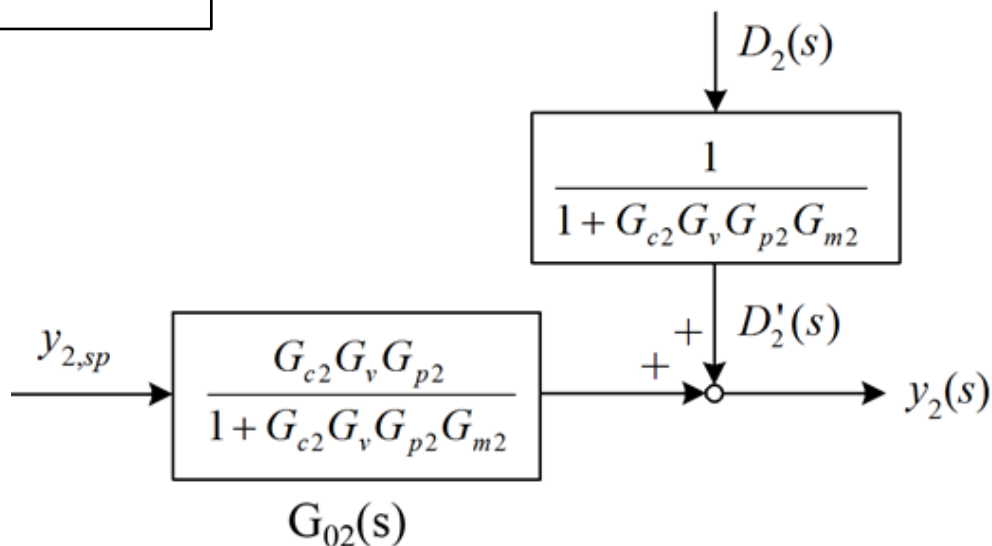
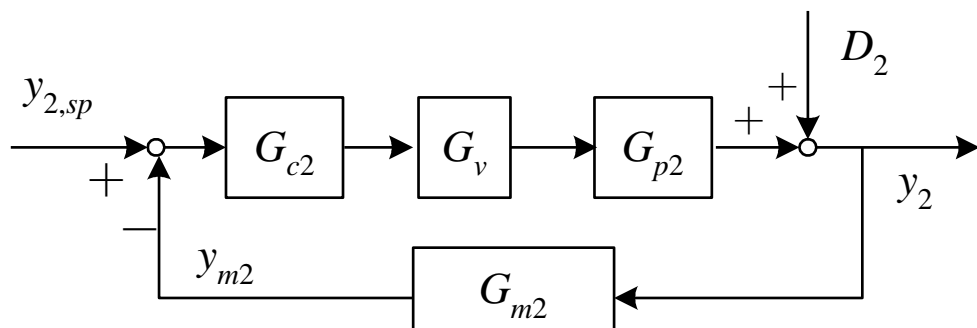
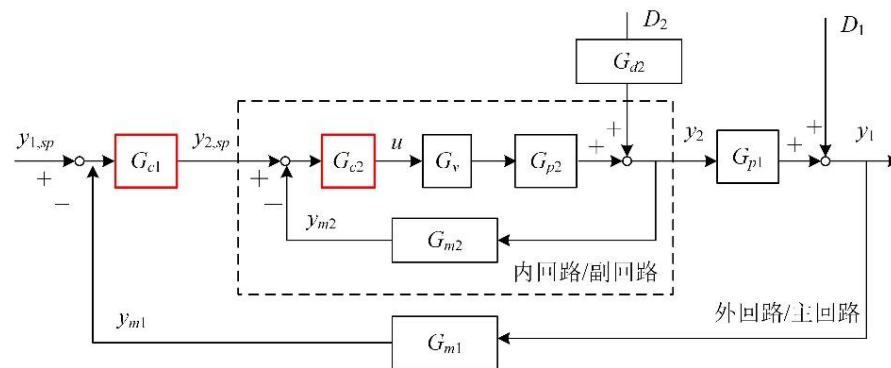
# 抗干扰能力增强：外回路



- 串级控制系统对于进入主回路的  $D_1$  干扰的抗干扰能力也有一定提高。
- 因为副回路的存在，副对象的时间常数减小了。
- 对于主回路来说，控制通道缩短了，相比同等条件下的简单控制系统，能够更加及时地克服  $D_1$  干扰。

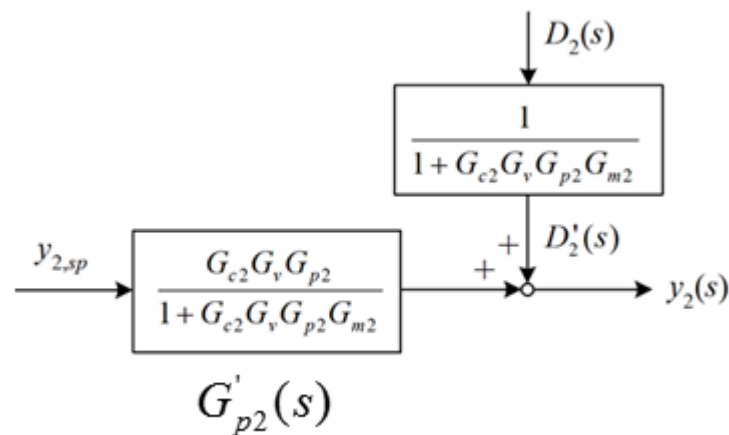
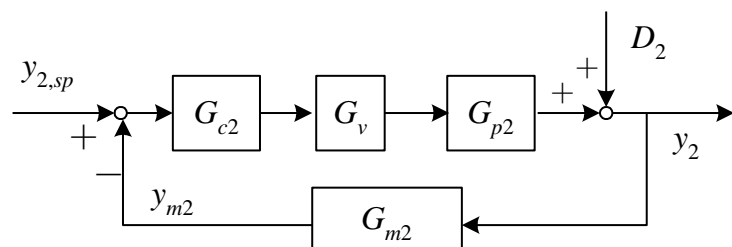
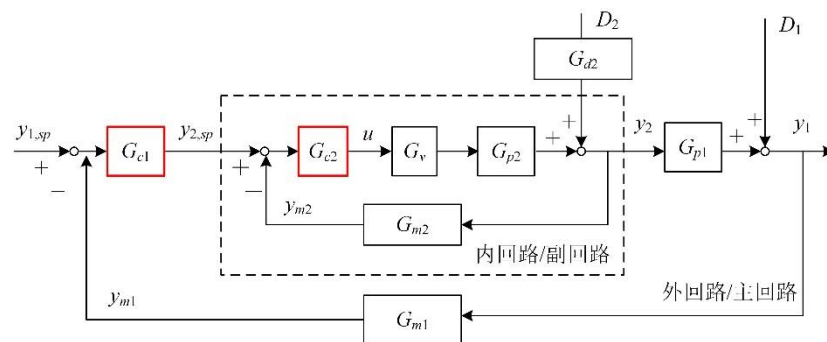
# 改善对象的动态特性

## ➤ 对内回路进行等价变换



# 改善对象的动态特性

- 等价变换后，串级系统中的副环代替了单回路中的一部分对象，亦即可以**把整个副回路看成一个等效对象**。
- 等效对象的**时间常数缩小了**  
 $(1 + K_{c2}K_vK_{m2}K_{p2})$  倍，而且随着副调节器比例增益的增大而减小。
- 通常情况下副对象是单容或双容对象，因此副调节器的比例增益可以取得很大，这样，等效时间常数就可以减到非常小的数值，从而**加快了副回路的响应速度，提高了系统的工作频率**。
- 由于副环起到了改善对象动态特性的作用，因此可以加大主调节器的增益，提高系统的工作频率。



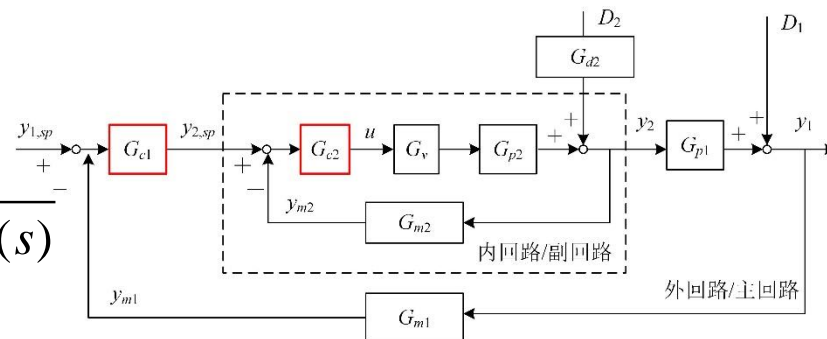
# 对负荷变化有一定的自适应能力

- 生产过程往往包含一些**非线性因素**。随着操作条件和负荷等的变化，对象的**静态增益也将发生变化**。
- 因此，在一定负荷下，即在确定的工作点情况下，按一定控制质量指标整定的控制器参数**只适应于工作点附近的一个小范围**。
- 如果负荷变化过大，超出这个范围，那么控制质量就会下降。
- 在单回路控制中若不采取其它措施是难以解决的。
- 在串级系统中，负荷变化所引起副回路内各个环节参数的变化，可以较少影响甚至不影响系统的控制质量。

# 对负荷变化有一定的自适应能力

➤ 等效副对象的传递函数

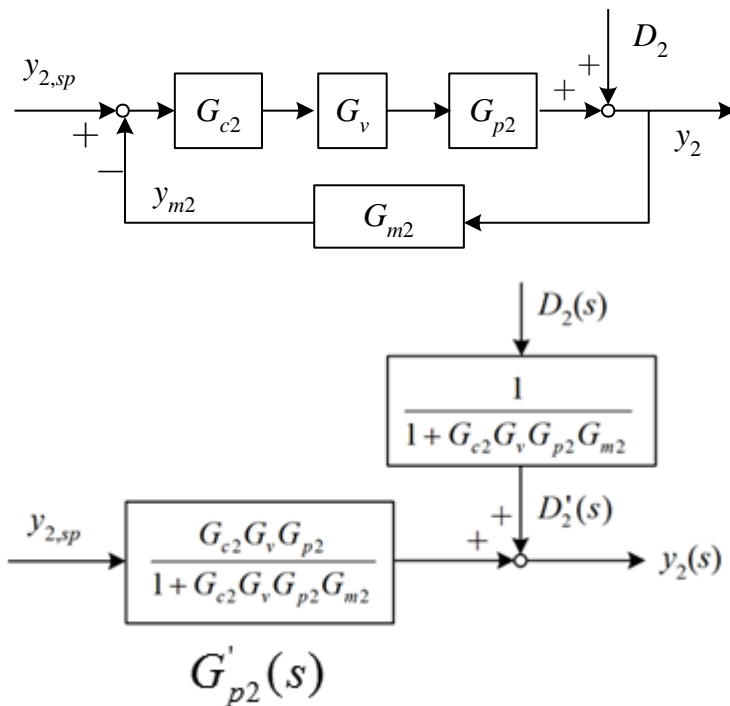
$$G'_{p2}(s) = \frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_v(s)G_{p2}(s)G_{m2}(s)}$$



➤ 一般情况下,

$$G_{c2}(s)G_v(s)G_{m2}(s)G_{p2}(s) \gg 1$$

➤ 因此  $G'_{p2}(s) \approx \frac{1}{G_{m2}(s)}$





# 对负荷变化有一定的自适应能力 $G'_{p2}(s) \approx \frac{1}{G_{m2}(s)}$

- 由此可知，串级系统中的**等效对象仅与测量变送装置有关**。
  - 如果副对象或调节阀的特性随负荷变化时，对等效对象的影响不大。
  - 只要测量变送环节进行了线性化处理，副对象和调节阀的非线性特性对整个系统的控制品质影响是很小的。
  - 因而，在不改变控制器整定参数的情况下，**系统的副回路能自动地克服非线性因素的影响**，保持或接近原有的控制质量。
- 另一方面，副回路通常是一个流量随动系统。当系统操作条件或负荷改变时，主控制器将改变其输出值，**副回路能快速跟踪及时而又精确地控制流量**，从而保证系统的控制品质。
- 从上述两个方面看，**串级控制系统对负荷的变化有一定自适应能力**。

# 串级控制系统具有较好的控制性能

串级控制系统具有较好控制性能的原因可以归纳为：

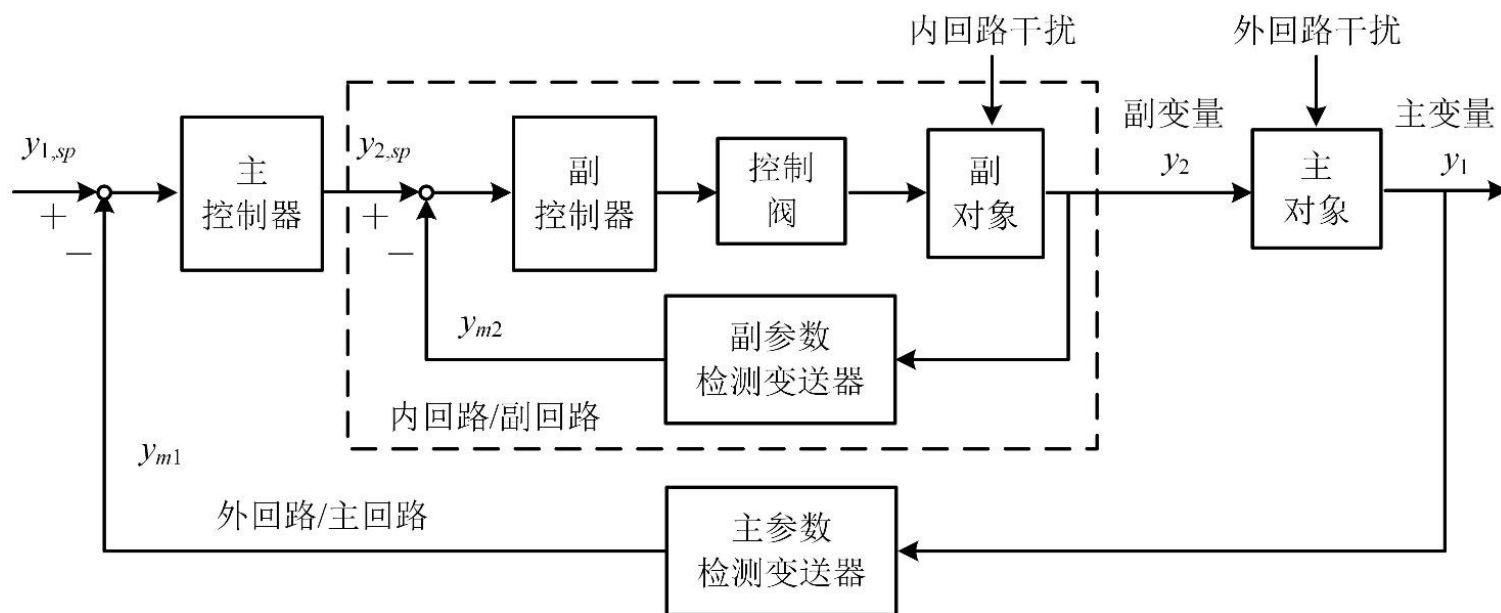
- 对内回路干扰有很强的克服能力；
- 改善了对对象的动态特性，提高了系统的工作频率；
- 对负荷或操作条件的变化有一定自适应能力。

# 第6章 串级控制系统

- 6.1 串级控制系统的基本概念
- 6.2 串级控制系统的分析
- **6.3 串级控制系统的设计**
- 6.4 串级控制系统的整定
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真

# 主变量的选择原则

- 如果把串级控制系统中的整个闭环副回路作为一个等效对象来考虑，可以看到，主回路与一般的单回路控制系统没有什么区别，主变量的选择原则与单回路控制系统的选择原则是一致的，无须特殊讨论。



# 副回路的选择

- 从上一节中的分析可以知道，串级系统的种种特点，都是因为增加了副回路的缘故。
- 可以说，副路的设计质量是保证发挥串级系统优点的关键所在。
- 从结构上看，副回路也是一个单回路。问题的实质在于，如何从整个对象中选取一部分作为副对象，然后组成一个副控制回路。
- 副回路设计的原则包括：
  1. **副参数**的选择应使副回路的时间常数小，调节通道短，反应灵敏
  2. **副回路**应包含被控对象所受到的主要干扰
  3. 应考虑**工艺**上的合理性、可能性和经济性

# 副回路设计的原则： 1. 副参数的选择

- 副参数的选择应使副回路的时间常数小，调节通道短，反应灵敏
- 通常串级系统被用来克服对象的容积滞后和纯迟延。
- 总是这样来选择副参数，使得副回路时间常数小，调节通道短，从而使等效对象的时间常数大大的减小，提高系统的工作频率，加快反应速度，缩短控制时间，最终改善系统的控制品质。

## 副回路设计的原则： 2. 副回路

- 副回路应包含被控对象所受到的主要干扰
- 串级系统对二次干扰有较强的克服能力。为了发挥充分这一特殊作用，在系统设计时，副参数的选择应使得副环尽可能多地包括一些扰动。
- 如果可能，将非线性对象包含在副回路中。
- 当然，也不能走极端，试图把所有的扰动都包括进去。这样的话，将使主调节器失去作用，也就不成其为串级控制了。
- 因此，在要求副回路调节通道短、反应快与尽可能多地纳入干扰这两者之间存在着矛盾，应在设计中加以协调。
- 另外，一般应使副环的频率比主环的频率高得多。

# 副回路设计的原则： 3. 工艺

- 应考虑工艺上的合理性、可能性和经济性
- 以上对副变量选择和副回路的讨论，都是从控制质量角度来考虑的，而在实际应用时，首先要考虑生产工艺的要求。
  - ① **副变量的选择**，应考虑工艺上主、副变量之间具有良好的对应关系，即调整副变量能有效地影响主变量，而且可以在线检测。
  - ② **串级控制系统的设计**，有时从控制角度看是比较合理的、可行的，但从工艺角度看，却是不合理的。这时就应该根据工艺的具体情况来改进设计。



# 主副回路工作频率的选择： 1. 共振现象

- 主、副回路是两个相互独立又密切相关的回路
- 在一定条件下，如果受到某种干扰的作用，主参数的变化进入副环时，会引起副环中副参数波动振幅的增加，而副参数的变化传送到主环后，又迫使主参数的变化幅度增加，如此循环往复，就会使主、副参数长时间地大幅度地波动，这就是所谓串级系统的**共振现象**。
- 一旦发生了共振，系统就失去控制，不仅使控制品质恶化，如不及时处理，甚至可能导致生产事故，引起严重后果。

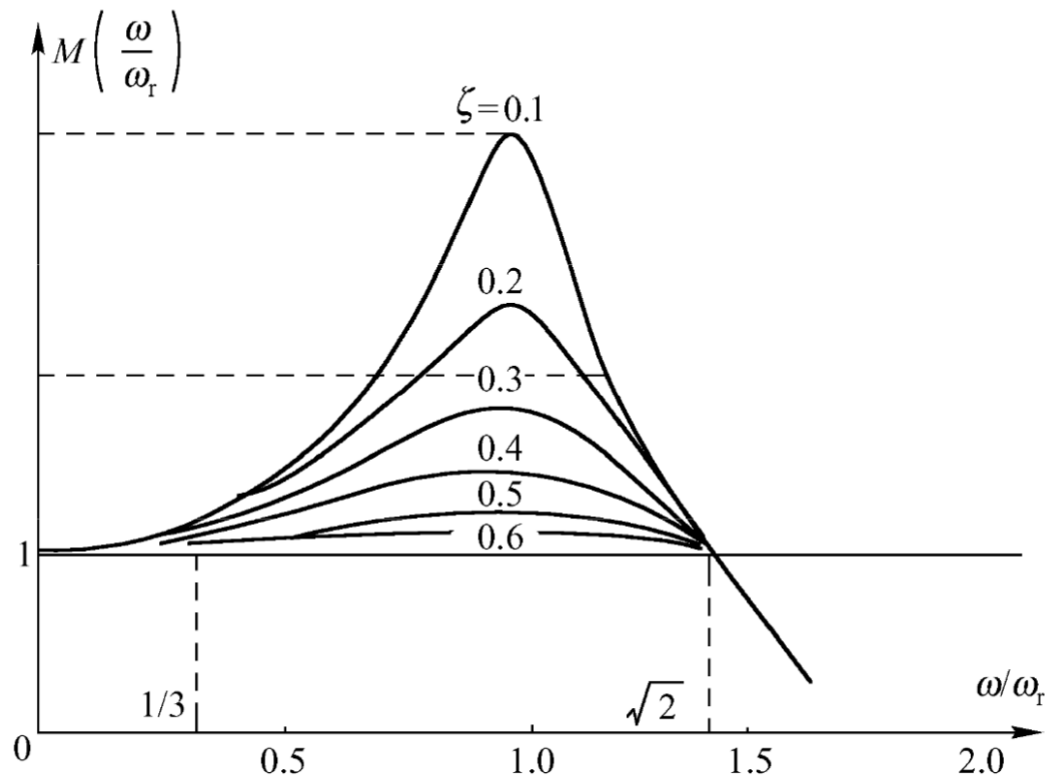
# 主副回路的工作频率：1. 共振现象

## ➤ 当系统阻尼比

$$\zeta < 0.707$$

二阶系统的幅频特性  
呈现一个峰值。

- 如果外界干扰信号的  
频率等于共振频率，  
则系统进入**谐振**，或  
称为**共振**。



二阶振荡系统的幅频特性

# 主副回路的工作频率： 2. 串级系统的共振条件



- 先假定串级系统的主、副回路都是二阶系统，而且都按4: 1衰减曲线的要求进行整定，即系统阻尼比  $\zeta=0.216$ 。
- 从副回路看，主调节器无时无刻地向副回路输送信号，相当于副回路一直受到从主回路来的一个连续性干扰。
- 为避免副回路进入共振区，主回路工作频率  $\omega_{d1}$  与副回路共振频率  $\omega_{d2}$  必须满足下式：

$$\frac{\omega_{d1}}{\omega_{d2}} < \frac{1}{3} \quad \text{或} \quad \frac{\omega_{d1}}{\omega_{d2}} > \sqrt{2}$$

- 为了避免主回路进入共振区

$$\frac{\omega_{d2}}{\omega_{d1}} < \frac{1}{3} \quad \text{或} \quad \frac{\omega_{d2}}{\omega_{d1}} > \sqrt{2}$$

## 主副回路的工作频率：2. 串级系统的共振条件

- 副回路通常是快速回路，其工作频率总是高于主回路的频率。
- 为了避免主、副回路进入共振区： $\omega_{d2} > 3\omega_{d1}$
- 为确保串级系统不受共振现象的威胁，一般取  $T_{d1} = (3 \sim 10)T_{d2}$
- 上述结论虽然是在假定主、副回路均是在二阶系统的前提下得到的，但也不失一般性。因为，系统经整定后，总有一对起主导作用的极点，整个回路的工作频率由他们决定，即可以把这个系统看作一个近似的二阶振荡系统。
- 当然，为了满足上式，使主回路的振荡周期为3至10倍于副回路的周期，除了副回路设计中加以考虑外，还与主、副调节器的整定参数有关。

# 主副控制器的选择

- 在串级控制系统中，主调节器和副调节器的任务不同，对于它们的选择即调节动作规律的选择也有不同考虑。
- 主副控制器的选择内容包括：
  1. 控制器**控制规律**的选择，
  2. 控制器**正、反作用**的选择
  3. 控制器**积分饱和**的预防。

# 1. 控制规律的选择：副调节器

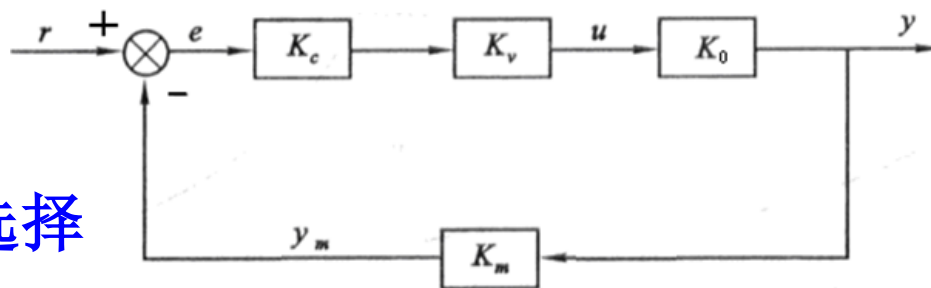
- 副调节器的任务是要快动作以迅速抵消落在副环内的二次扰动，而且副参数则并不要求无差。
- 一般都选 P 调节器。
- 也可以采用 PD 调节器，但这增加了系统的复杂性，而效果并不很大。在一般情况下，采用 P 调节器就足够了。
- 如主、副环的频率相差很大，也可以考虑采用 PI 调节器。

# 1. 控制规律的选择：主调节器

- 主调节器的任务是准确保持被调量符合生产要求。
- 凡是需要采用串级调节的场合，工艺上对控制品质的要求总是很高的，不允许被调量存在偏差，因此，主调节器都必须具有积分作用。
- 一般都采用 PI 调节器。
- 如果副环外面的容积数目较多，同时有主要扰动落在副环外面的话，就可以考虑采用 PID 调节器。如主、副环的频率相差很大，也可以考虑采用 PI 调节器。

## 2. 控制器正、反作用的选择：副控制器

- 与简单控制系统一样，一个串级控制系统要实现正常地运行，系统的主、副回路都必须构成负反馈。因而，必须正确选择主、副控制器的正、反作用方式。



### (1) 副控制器正、反作用的选择

- 串级控制系统中，副控制器作用方式的选择，是根据工艺安全等要求，在选定调节阀的气开、气关形式后，按照使副回路构成副反馈系统的原则来确定的。
- 因此，副控制器的作用方式与副对象特性及调节阀的气开、气关形式有关，其选择方法与简单控制系统中控制器正、反作用方式的选择方法相同。这时可不考虑主控制器的作用方式，只是将主控制器的输出作为副控制器的设定值即可。



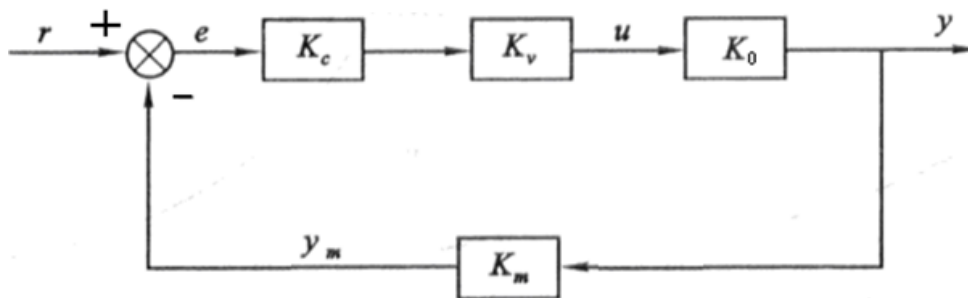
## 2. 控制器正、反作用的选择：副控制器

- 在假定副测量变送装置的增益为正的情况下，副控制器正反作用选择的判别式为

$$(\text{副控制器}\pm) \times (\text{调节阀}\pm) \times (\text{副对象}\pm) = (-)$$

其中，

- 调节阀的“±”取决于它的“气开”还是“气关”作用方式，“气开”为“+”，“气关”为“-”；
- 副对象的“±”取决于控制变量和副被控变量的关系，控制变量增大，副被控变量也增大时称其为“+”，否则称其为“-”。



## 2. 控制器正、反作用的选择：主控制器

### (2) 主控制器正、反作用的选择

- 在串级控制系统中，主控制器作用方式的选择完全由工艺情况确定，而与调节阀的气开、气关形式及副控制器的作用方式都完全无关，即只需根据主对象的特性，选择与其作用方向相反的主控制器就行了。
- 由于副回路是一个随动控制系统，在选择主控制器的作用方式时，要首先把整个副回路简化为一个环节，该环节的输入信号是主控制器的输出信号（即副回路的设定值），而输出信号就是副变量，其副回路的输入信号与输出信号之间总是要求为正作用，即输入增加，输出亦增加。因此，整个副回路可看成为一个增益为正的环节。

## 2. 控制器正、反作用的选择：主控制器

- 这样，在假定主测量变送装置的增益为正的情况下，主控制器正、反作用的选择实际上只取决于主对象的增益符号。
- 主控制器正反作用方式选择的判别式为

$$(\text{主控制器}\pm) \times (\text{主对象}\pm) = (-)$$

- 由这个判别式也可看出，主控制器的作用方向与主对象的特性相反。即当主对象为正作用时，主控制器选反作用；而当主对象为负作用时，主控制器选正作用。

## 2. 控制器正、反作用的选择：注意事项

- 应当说明，有些生产过程要求控制系统既可以进行串级控制，又可以由主控制器单独控制。
- 两种控制方式切换时，必须要注意，主控制器的正、反作用方式是否需要改变。
- 如果副控制器是反作用，那么切换时主控制器的作用方式无需改变；如果副控制器是正作用，那么切换时主控制器的作用方式必须改变。这一点在实施中要特别注意。

### 3. 防止控制器积分饱和的措施

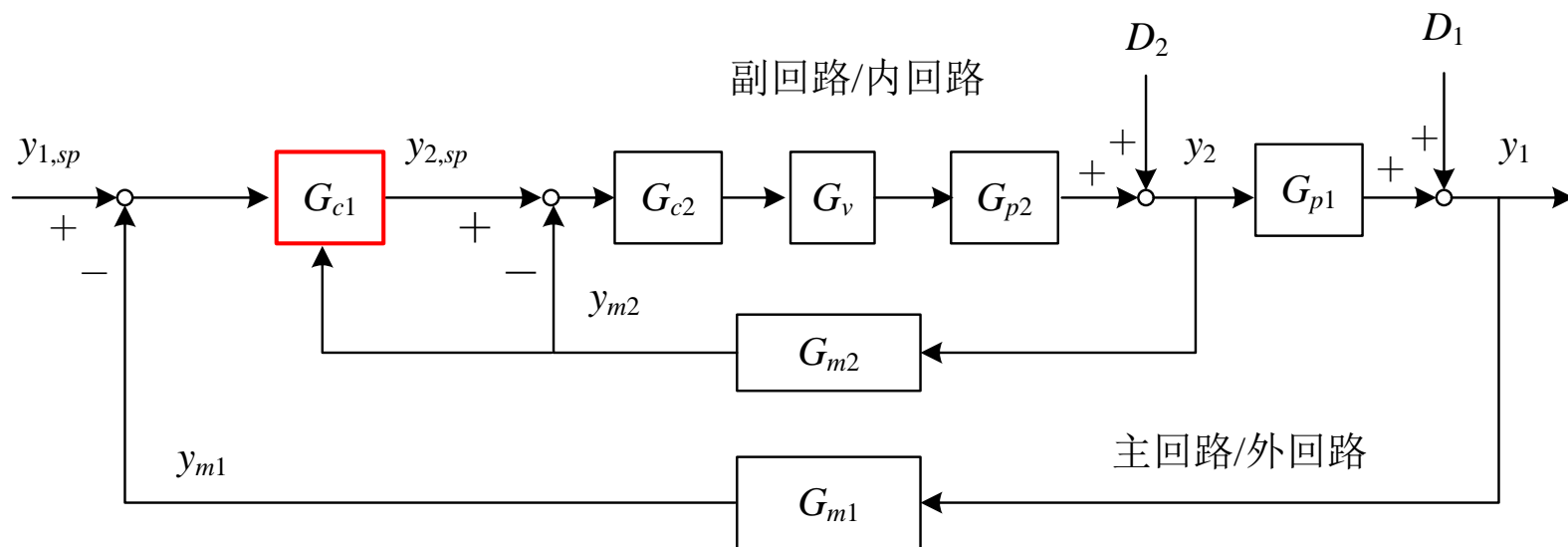
- 对于具有积分作用的控制器，当系统长时间存在偏差而不能消除时，控制器将出现**积分饱和**现象。
- 这一现象将造成系统控制品质下降甚至失控。
- 在串级控制系统中，如果副控制器只是 P 作用，而主控制器是 PI 或 PID 控制时，出现积分饱和的条件与单回路控制系统的情况相同，利用**外部积分反馈法**，只要在主控制器的反馈回路中加一个间歇单元，就可以有效地防止积分饱和。

### 3. 防止控制器积分饱和的措施

- 但是，如果主、副调节器均具有积分作用，就存在两个调节器的输出分别达到极限值的可能。
- 此时，积分饱和的情况显然比单回路系统要严重得多。虽然**利用间歇单元可以防止副调节器的积分饱和，但对主调节器却无所助益。**
- 如果由于任何原因，副调节器不能对主调节器的输出变化做出响应，主调节器将会出现积分饱和。
- 同样，当副调节器逐渐达到饱和，那么主调节器的输出无需到达极限，主回路就会开环。
- 在这种情况下，必须采取其它抗积分饱和措施。

### 3. 防止控制器积分饱和的措施

- 如图所示，根据副回路的偏差来防止主控制器积分饱和的方案。
- 采用副参数  $Y_2(s)$  作为主控制器的外部反馈信号。
- 这种方案的另外一个特点是将副回路包围在了主控制器的正反馈回路之中，实现了补偿反馈，这必定会改善主回路的性能。



# 第6章 串级控制系统

- 6.1 串级控制系统的基本概念
- 6.2 串级控制系统的分析
- 6.3 串级控制系统的设计
- **6.4 串级控制系统的整定**
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真



# 串级控制系统的整定

- 串级系统的整定要比简单系统复杂些。
- 两个调节器串在一起，在一个系统中工作，互相之间或多或少有影响。
- 运行中，主环和副环的波动频率不同，副环频率较高，主环频率较低。当然这些频率主要决定于调节对象的动态特性，但也与主、副调节器的整定情况有关。
- 在整定时，应当尽量加大副调节器的增益以提高副环的频率，目的是使主、副环的频率错开，最好相差三倍以上，以减少相互之间的影响。
- 在运行中，有时会把主环从自动切换到手动操作，副调节器的整定要考虑到这个情况，它自己应能很好地独立工作。

# 串级控制系统的整定

- 在一般情况下，主、副回路的频率相差很多，互相之间的影响不大。这时，就可以
  - 首先，在主环开路的情况下，接通常整定简单控制系统的方法整定副调节器；
  - 然后，在投入副调节器的情况下，再接通常方法，整定主调节器。
- 由于受到副参数选择的限制，主、副回路的频率比较接近的情况下，它们之间的影响就比较大。在这种情况下，就需要在主、副回路之间反复进行试凑，才能达到最佳的整定。这样的反复试凑是很麻烦的。
- 三种串级系统整定的方法：
  - 逐步逼近法，两步整定法，一步整定法

# 逐步逼近法

它是一种依次整定主回路、副回路，然后循环进行，逐步接近主、副回路的最佳整定的一种方法，其步骤如下：

## (1)首先整定副环

- 此时断开主环，按照单回路整定方法，求取副调节器的整定参数，得到第一次整定值，记作 $[G_{c2}]_1$ 。

## (2)整定主环

- 把刚整定好的副环作为主环中的一个环节，仍按单回路整定方法，求取主调节器的整定参数，记作 $[G_{c1}]_1$ 。

# 逐步逼近法

## (3)再次整定副环

- 注意此时副回路、主回路都已闭合。在主调节器的整定参数为 $[G_{c1}]_1$ 的条件下，按单回路整定方法，重新求取副调节器的整定参数为 $[G_{c2}]_2$ 。
- 至此，已完成一个循环的整定。

## (4)重新整定主环

- 同样是在两个回路都闭合、副调节器整定参数为 $[G_{c2}]_2$ 的情况下，重新整定主调节器，得到 $[G_{c1}]_2$ 。

## (5) 按上面(3)、(4)步继续进行，直到控制效果满意为止。

一般情况下，完成第(3)步甚至只要完成第(2)步就已满足品质要求，无需继续进行。这种方法往往费时较多。

# 两步整定法

它是一种先整定副环，后整定主环的一种方法，其步骤如下：

## (1)先整定副环

- 在主、副回路均闭合，主、副调节器都置于纯比例作用的条件下，将主调节器的比例带  $\delta$  放在 100% 处，按单回路整定法整定副环，这时得到副调节器的衰减率  $\psi=0.75$  时比例带  $\delta_{2s}$  和副参数振荡周期  $T_{20}$ 。

## (2)整定主环

- 主、副环仍然闭合，副调节器置于  $\delta_{2s}$  值上，用同样方法整定主调节器，得到主调节器在  $\psi=0.75$  下的比例带  $\delta_{1s}$  值和被调量的振荡周期  $T_{10}$ 。

(3)利用“**衰减曲线法**”的计算公式，依据上面两次整定得到的  $\delta_{1s}$ 、 $\delta_{2s}$  和  $T_{10}$  与  $T_{20}$ ，按所选调节器的类型，分别求出调节器的整定参数值。

当然，按计算出来的整定参数进行投运，不一定能够满足要求，仍需继续试验，适当修正，直到符合要求。

# 一步整定法

- 两步整定法虽然比逐步逼近法简便得多，但仍然要分两步进行整定，**要寻求两个4: 1的衰减振荡过程**。因而仍比较麻烦。
- 人们在采用两步法整定参数的实践中，对两步法反复进行总结、简化，从而得到了一步整定法。
- 所谓**一步整定法**，就是**根据经验先确定副控制器的比例度，然后按照单回路控制系统的整定方法整定主控制器的参数**。
- 一步法的整定准确性虽然比两步法低一些，但由于方法更简便，易于操作和掌握，因而在**工程上得到了广泛的应用**。

# 一步整定法

- 一步整定法是在工程实践中被发现的。
- 对一个串级控制系统，在**纯比例控制**的情况下，要得到**主变量的4: 1衰减振荡过程**，主、副控制器的放大系数 $K_{c1}$ 、 $K_{c2}$ 可以有好几组搭配，它们的相互关系近似地满足 $K_{c1} \cdot K_{c2} = K_s$ （常数），如表所示的实验数据可以说明这一点。

表 6-1 主、副控制器放大系数匹配实验数据

参数 序号	副 控 制 器		主 控 制 器		过渡过程时间 (min)	$K_s$
	$\delta_2$	$K_{c2}$	$\delta_1$	$K_{c1}$		
1	40%	2.5	75%	1.33	9	3.32
2	30%	3.33	100%	1	10	3.33
3	25%	4	125%	0.8	8	3.2

# 一步整定法

- 当采用1至3组整定参数时，主变量均可得到4：1衰减振荡过程，且过渡过程时间均在9min左右，而 $K_s$ 一般为3.3。
- 这说明，主、副控制器的放大系数可以在一定范围内任意的匹配，而控制效果基本相同。
- 这样就可以
  - 依据经验，先将副控制器的比例度确定一个数值，
  - 然后，按一般单回路控制系统参数整定方法整定主控制器的参数。
- 虽然副控制器按经验设置的比例度不一定很合适，但是可以通过调整主控制器的比例度进行补偿，使主变量最终得到4：1的衰减振荡过程。



# 一步整定法

- 对副控制器的比例带  $\delta_2$  或放大系数  $K_{c2}$  的估计，可利用表中经验数值进行确定一个范围。

表 6-2 副控制器比例度取值范围

副 变 量	放大系数 $K_{c2}$	比例度 $\delta_2$ (%)
温度	5~1.7	20~60
压力	3~1.4	30~70
流量	2.5~1.25	40~80
液位	5~1.25	20~80

# 一步整定法

一步整定法的具体步骤:

- 1) 由表6-2选择副控制器的比例带 $\delta_2$ ，使副回路按纯比例控制运行；
- 2) 将系统投入串级控制状态运行，按简单控制系统参数整定的方法对主控制器进行参数整定，使主变量的控制品质最佳。

# 第6章 串级控制系统

- 6.1 串级控制系统的基本概念
- 6.2 串级控制系统的分析
- 6.3 串级控制系统的设计
- 6.4 串级控制系统的整定
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真

# 串级控制系统的投运

- 为了保证串级控制系统顺利地投入运行，并能达到预期的控制效果，必须做好投运前的准备工作，具体的准备工作与简单控制系统相同，这里不再重述。
- 选用不同类型的仪表组成的串级控制系统，投运方法也有所不同，但是所遵循的原则基本上都是相同的。
- ① 其一是投运顺序，串级控制系统有两种投运方式：一种是先投副回路后投主回路；另一种是先投主回路后投副回路。目前一般都采用“先投副回路，后投主回路”的投运顺序；
- ② 其二是和简单控制系统的投运要求一样，在投运过程中必须保证无扰动切换。

# 串级控制系统投运步骤示例

➤ 以DDZ-III型仪表组成的串级控制系统的投运为例，具体投运步骤如下：

- 1) 将**主、副控制器都置于手动位置**，主控制器设置为“内给（定）”，并设置好主设定值，副控制器设置为“外给（定）”，并将主、副控制器的正、反作用置于正确的位置；
- 2) 在**副控制器处于软手动状态下进行遥控操作**，使生产处于所要求的工况，即使主变量逐步在主设定值附近稳定下来；
- 3) 调整副控制器手动输出至偏差为零时，将**副控制器切换到“自动”**位置；
- 4) 调整主控制器的手动输出至偏差为零时，将**主控制器切入“自动”**。

这样就完成了串级控制系统的整个投运工作，而且投运过程是无扰动的。

# 第6章 串级控制系统

- 6.1 串级控制系统的基本概念
- 6.2 串级控制系统的分析
- 6.3 串级控制系统的设计
- 6.4 串级控制系统的整定
- 6.5 串级控制系统的投运
- 6.6 利用MATLAB对串级控制系统进行仿真

# 本章小结

- 串级控制系统具有两个闭合回路，采用两个控制器串联工作，主控制器的输出作为副控制器的设定值，由副控制器的输出去操纵调节阀。以主控制器为主导，保证主变量稳定为目的；尤其是对于二次干扰，副控制器首先进行“粗调”，主控制器再进行“细调”。
- 串级控制系统相比简单控制系统有四大优点：1. 减小了对象的时间常数，缩短了控制通道，使控制作用更加及时，提高了系统的响应速度；2. 提高了系统的工作频率，在衰减比相同的条件下，缩短了调节时间；3. 提高了系统的抗干扰能力，尤其是对二次干扰，具有超前控制作用；4. 对负荷或操作条件的改变具有一定的自适应能力。
- 串级控制系统副变量的选择条件为：1. 应将主要的和更多的干扰包括在副回路当中；2. 应使副回路时间常数小，调节通道短，一般副回路的工作频率为主回路的3~10倍；3. 应保证生产工艺的合理性、实现的可能性和投入产出的经济性。
- 由于在串级控制系统中，主控变量不允许存在偏差，因此主控制器都必须具有积分作用，一般采用PI控制器或PID控制器；副控制器的任务是要快动作以迅速抵消落在副回路内的二次扰动，一般选P控制器。
- 副控制器正反作用选择（副控制器±）×（调节阀±）×（副对象±）=（-）；主控制器正反作用选择（主控制器±）×（主对象±）=（-）。
- 在串级控制系统中必须采取抗积分饱和措施。
- 串级控制系统参数整定有三种方法：逐步逼近法、两步整定法和一步整定法。