串级、分程、比值、前馈、选择性和三冲量六种复杂控制系统简述

Overview of Six Kinds of Complex Control Systems: Cascade, Dividing, Ratio, Feedforward, Selective and Three-Impulse

摘要：本文主要针对各种工业生产和仪器设备中的温度、流量、真空、压力和张力等参数的高精度自动控制，介绍了几种常用的复杂控制系统，如串级、分程、比值、前馈-反馈、选择性以及三冲量控制系统。本文主要目的是展示这些复杂控制技术基本概念，为后续推出的各种复杂控制用PID调节器做基础技术讲解，以便在实际自动化控制中能充分发挥复杂控制用PID调节器的强大功能。

一、概述

控制系统一般又可分为简单控制系统和复杂控制系统两大类，所谓复杂，是相对于简单而言的。凡是多参数，具有两个以上传感器、两个以上调节器或两个以上执行器组成多回路的自动控制系统，通称为复杂控制系统。

如图1所示，目前常用的复杂控制系统有串级、分程、比值、前馈-反馈、选择性以及三冲量等几种形式，并且随着生产发展的需要和科学技术进步，还会陆续出现了许多其他新型的复杂控制系统。

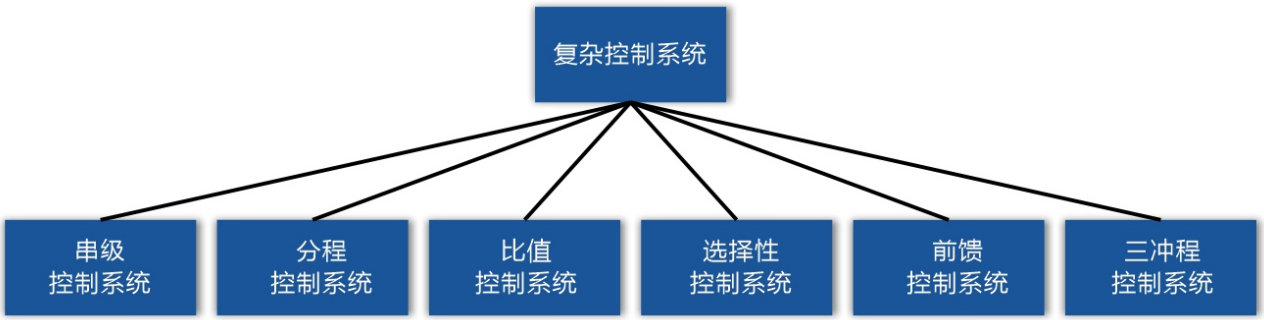


图1 常用的几种复杂控制系统

本文将针对上述几种复杂控制系统，重点介绍这些复杂控制系统中使用的超高精度PID控制器和典型应用案例，以期提高工程应用的设计效率、提高控制效果和降低成本造价。

二、串级控制（Cascade Control）系统

串级控制系统是应用最早和最广泛的一种复杂控制系统，它是根据系统结构命名。串级控制系统由两个或两个以上的控制器串联连接组成，一个控制器的输出作为另一个控制器的设定值，这类控制系统称为串级控制系统。

串级控制系统的特点是将两个PID调节器相串联，主调节器的输出作为副调节器的设定，当被控对象的滞后较大，干扰比较剧烈、频繁时，可考虑采用串级控制系统。特别是需要进行超高精度控制，以及跨参数和跨量程控制时，串级控制系统则能重复发挥其优势。

串级控制系统广泛应用于温度、真空、流量、压力和张力控制等方面，典型的串级控制系统结构如图1所示。

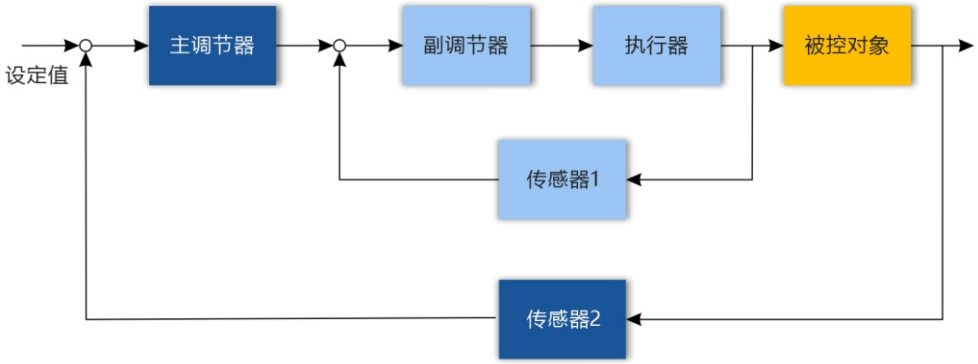


图2 串级控制系统结构示意图

如图2所示，串级控制系统包括副控回路（由副调节器、执行器和传感器1组成）和主控回路（由主调节器、副控回路和传感器2组成），主控回路和副控回路以串联形式与被控对象连接，其中副控回路相当于主控回路中的执行器。以下是串级控制系统中各部分的主要功能：

（1）主调节器（主控制器）：根据主参数（传感器2测量值）与设定值的偏差而进行PID调节，其输出作为副调节器的设定值。

（2）副调节器（副控制器）：其设定值由主调节器的输出决定，并根据副参数（传感器1测量值）与给定值（即主调节器输出）的偏差进行PID调节。

（3）副回路（内回路）：由副参数（传感器1）、副调节器及所包括的一部分被控对象所组成的闭环回路（随动回路）

（4）主回路（外回路）：将副回路看做是一个执行器，则主参数（传感器2）、主调节器、副回路及被控对象组成的闭环回路（主动回路）。

（5）主对象（被控对象、惰性区）：主参数（一般为传感器2）所处的那一部分工艺设备，它的输入信号为副变量，输出信号为主参数（主变量）。

（6）副对象（导前区）：副参数所处的那一部分工艺设备，它的输入信号为主调节量，其输出信号为副参数（副变量）。

串级控制系统是在单回路控制结构上增加了一个随动的副回路，因此，与单回路控制相比有以下几个特点：

（1）对进入副回路的扰动具有较迅速和较强的克服能力。

（2）可以改善对象特性，特别是能提高控制精度和工作效率。

（3）可消除副回路的非线性特性的影响。

（4）可实现夸参数和夸量程的控制。

（5）串级控制系统具有一定的自适应能力。

二、分程控制（Split-Range Control）系统

简单控制系统就是一个调节器的输出驱动一个执行器动作，而分程控制系统的特点是一个调节器的输出同时驱动几个工作范围不同的执行器。

通常，在一个简单控制系统中，一个调节器的输出信号只控制一个执行器，其结构与特性如图3(a）所示。如果一个调节器的输出信号同时送给两个执行器，这就是一种分程控制系统。这里两个执行器并联使用，其工作特性如图3(b）所示。

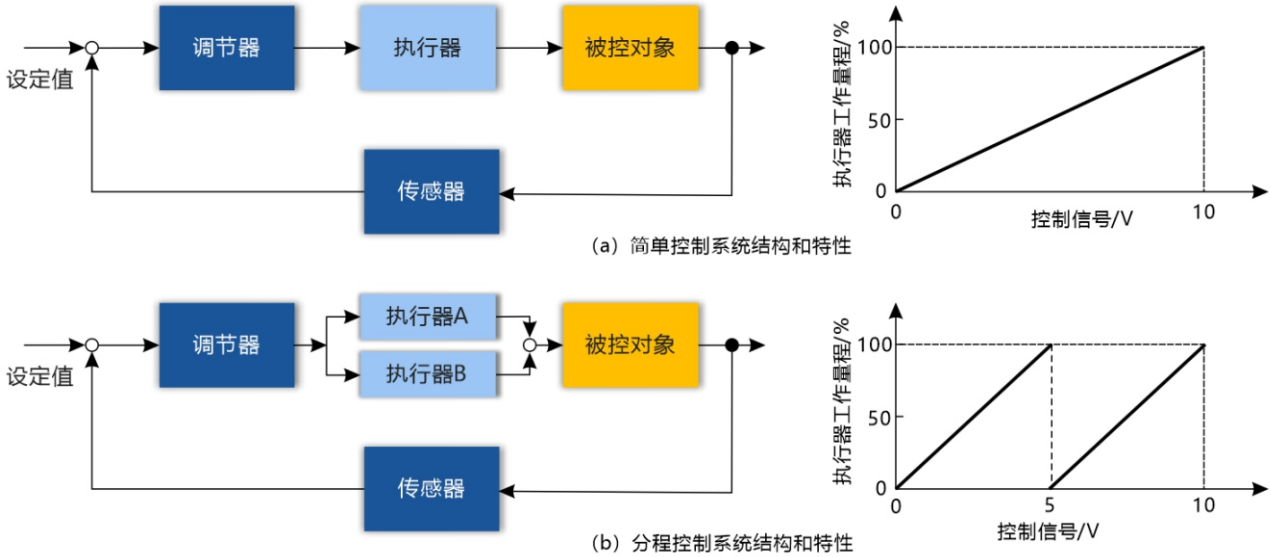


图3 简单（a）和分程（b）控制系统结构和特性示意图

分程控制已经广泛应用在温度、流量和压力控制等工业流程当中，也通常用来控制双模式的运行场合。例如，分程控制被用在保持一个既有加热控制又有冷却控制的容器内的温度。当其温度（单一测量值）低于目标温度设定值时，首先关闭冷却装置，然后开始打开加热装置。当温度上升到设定值以上时，首先关闭加热装置，然后开始打开冷却装置。另外一种分程控制方式是，采用分段量程控制来调整两个执行器从而实现更大范围内的操作。一个执行器控制低量程范围，另一个执行器控制高量程范围。以上两种应用场合都要求在每一个流程管线上配备一个执行器。

分程控制的典型应用是聚合反应工艺、冷热循环浴、TEC半导体温度控制、动态平衡法的真空和压力控制等。

三、比值控制（Ratio Control）系统

为保持两种或两种以上变量比值为恒定的控制叫比值控制。在炼油、化工、燃烧、制药、造纸和晶体生长等生产过程中，经常要求两种或两种以上的物料或工作气体按一定比例混合后进行工作。一旦比例失调，就会影响生产的正常运行，影响产品质量，甚至发生生产事故。

在比值控制系统中，一个变量需要跟随另一变量变化。前者称为从动量S，后者称为主动量M，比值K=M/S。通常选择的主动量应是系统中主要的物料或关键物料的相关变量，它们通常是可测不可控。常见的比值控制系统有单闭环比值、双闭环比值、串级比值（变比值）三种。

3.1 单闭环比值控制系统

单闭环比值控制系统结构如图4所示。

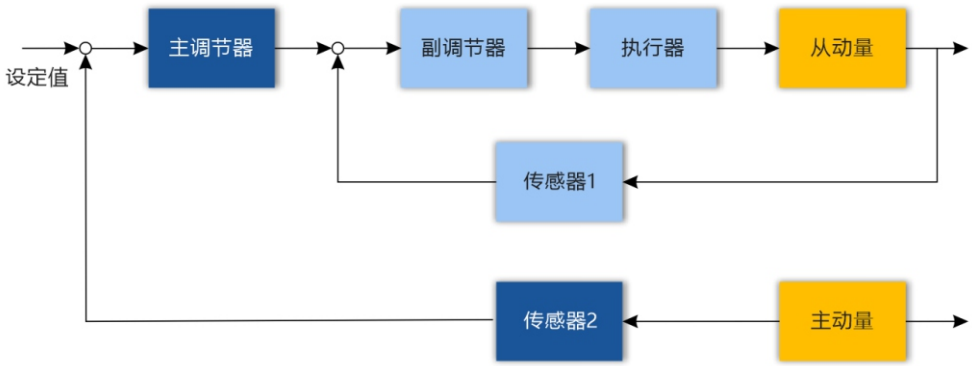


图4 单闭环比值控制系统结构框图

单闭环比值控制系统的优点是不但能实现从动量跟踪主动量变化，而且能克服从动量干扰等。结构简单，能确保比值不变，是应用最多的方案。但缺点是主动量不受控。

如图2和图4所示，单闭环比值控制系统与串级控制非常相似，但它们的不同之处在于：

（1）单闭环比值控制系统无主对象，即主动量不受控，并且从动量不会影响主动量。

（2）串级控制系统中，副变量是操纵变量到被控变量之间总对象的一个中间变量，该副变量是主对象的输入，通过改变副被控变量来调节主被控变量。

（3）串级控制的副控回路与比值控制系统的从动量控制子系统都是随动控制系统。

（4）比值控制系统中，从动量控制系统是随动控制系统，其设定值由系统外部的主调节器提供，其任务就是使从动量尽可能地保持与设定值相等，随着主动量的变化，始终保持主动量与从动量的比值关系。

（5）在系统稳定时，该比值是比较精确的，在动态过程中，比值关系相对不够精确。

（6）当主动量处于不变状态时，从动量控制系统又相当于一个定值控制系统。

3.2 双闭环比值控制系统

在主动量也需要控制时，增加一个主动量闭环控制系统，单闭环比值控制系统成为双闭环比值控制系统，双闭环比值控制系统结构如图5所示。

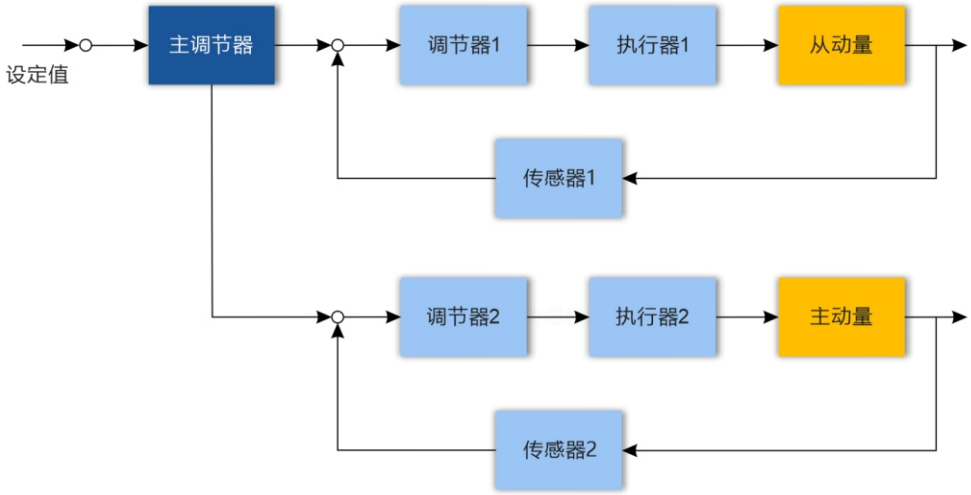


图5 双闭环比值控制系统结构框图

双闭环比值控制系统的优点是：能克服主动量扰动，实现其定值控制。从动量控制回路能抑制作用于副回路中的扰动，使从动量与主动量成比值关系。当扰动消除后，主动量和从动量都恢复到原设定值上，其比值不变，并且主动量和从动量都变化平稳。当系统需要改变时，只要改变主动量的设定值，主动量和从动量就会按比例同时增加或减小，从而克服了上述单闭环比值控制系统的缺点。

双闭环比值控制系统常用于主动量和从动量扰动频繁，工艺参数经常需要改变，同时要求系统总参数恒定的工艺过程，如无此要求，可采用两个单独的闭环控制系统来保持比值关系。

在采用双闭环比值控制方案时，对主动量控制器的参数整定应尽量保证其输出为非周期变化，以防止共振的产生。

3.3 变比值控制系统

当系统中存在着除主动量和从动量干扰外的其他干扰，为了保证产品质量，必须适当修正两变量的比值。因此，出现了按照一定工艺指标自动修正比值系数的变比值控制系统。变比值控制系统要求两个变量的比值能灵活低地随第三变量的需要而进行调整，由此可见，变比值控制系统是一个以第三个变量为主变量、以其他两个变量比值为副变量的串级控制系统，有时变比值控制系统也成为串级比值控制系统。在变比值控制系统中，比值只是一种手段，不是最终目的，而第三变量往往是产品质量或工艺指标。

同样，变比值控制系统也可以有单闭环和双闭环形式，如图6所示。

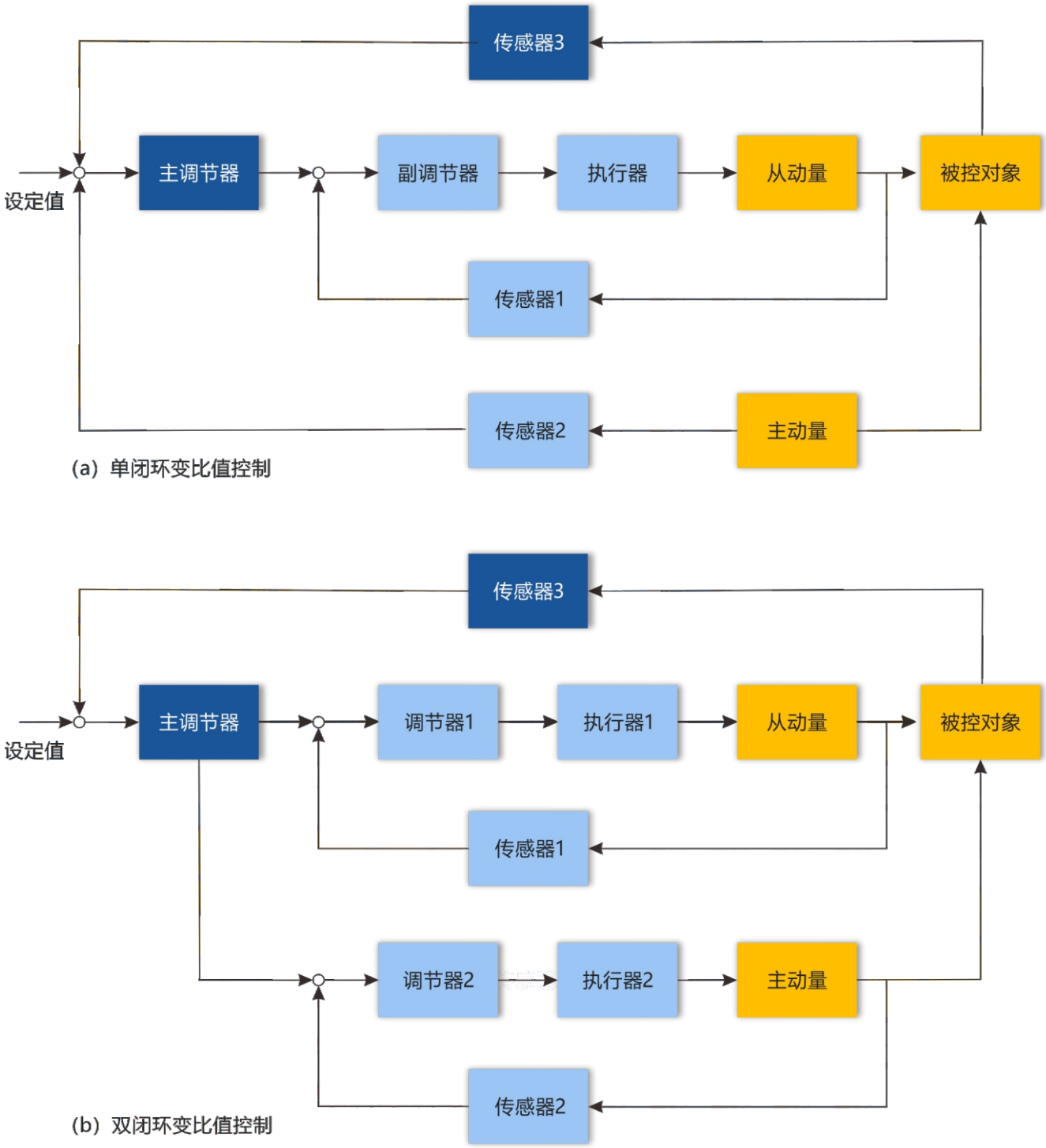


图6 变比值控制系统结构框图：（a）单闭环结构；（b）双闭环结构

四、前馈控制（Feedforward Control）系统

简单控制系统一般都属于反馈控制（feedback control），是按被控变量与设定值的偏差进行控制，因此只有在偏差产生后，调节器才对操纵变量进行控制，以补偿扰动变量对被控变量的影响。若扰动已经产生，而被控量尚未发生变化，反馈控制作用是不会产生的，所以，这种控制作用总是落后于扰动作用的，是不及时的控制。

由此，依据预防控制策略设计的控制系统称为前馈控制系统。前馈控制系统是根据扰动或给定值的变化按补偿原理来工作的控制系统，其特点是当扰动产生后，被控变量还未变化以前，根据扰动作用的大小进行控制，以补偿扰动作用对被控变量的影响。前馈控制系统运用得当，可以使被控变量的扰动消灭在萌芽之中，使被控变量不会因扰动作用或给定值变化而产生偏差，它较之反馈控制能更加及时地进行控制，并且不受系统滞后的影响。采用前馈控制系统的条件是：

（1）扰动可测但不可控。

（2）变化频繁且变化幅度大的扰动。

（3）扰动对被控变量的影响显著，反馈控制难以及时克服，且过程控制精度要求又十分严格的情况。

前馈控制的好处是直接控制无滞后，可以提高系统的响应速率，但是需要比较准确地知道被控对象模型和系统特性。而反馈控制的优点是不需要知道被控对象的模型即可实现比较准确的控制，但是需要偏差发生之后才能进行调节，具有滞后性。所以，理论上把前馈和反馈结合起来，既能实现较高的控制精度，也能提高系统响应速度。需要注意的是：前馈控制属于开环控制，反馈控制属于闭环控制。

前馈反馈控制系统有两种结构形式，一种是前馈控制作用与反馈控制作用相乘；另一种是前馈控制作用与反馈控制作用相加，这是前馈反馈控制系统中最典型的结构形式。典型的前馈-反馈控制系统结构如图7所示。

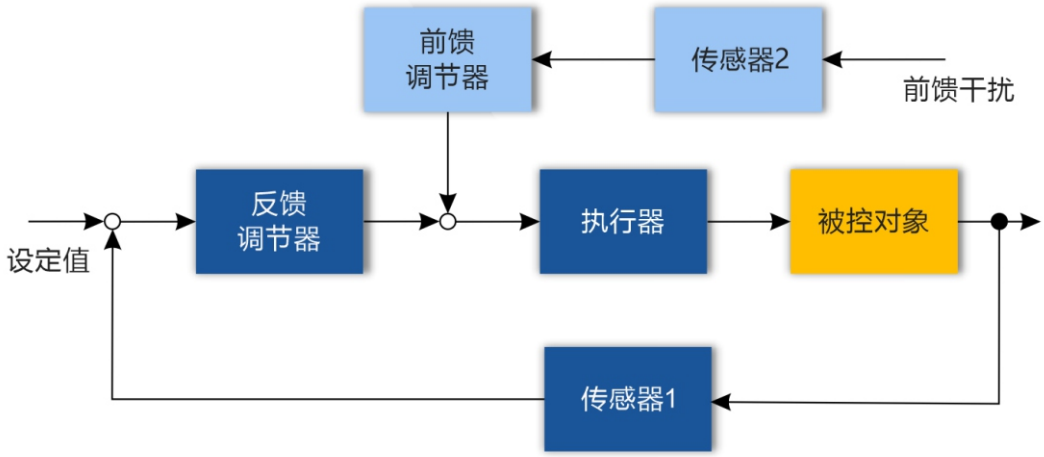


图7 前馈-反馈控制系统结构框图

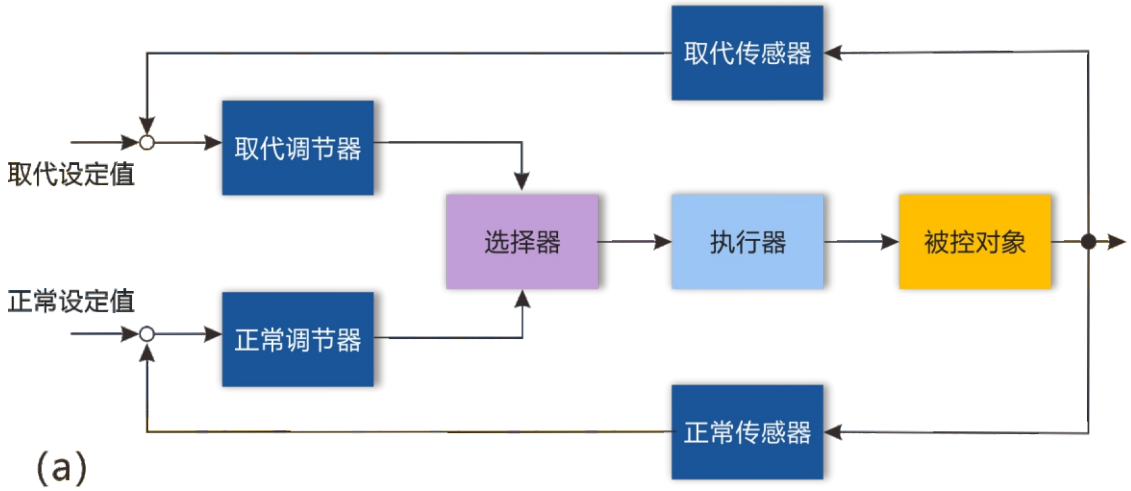
在高精度控制中，前馈控制可用来提高系统的跟踪性能。经典控制理论中的前馈控制设计是基于复合控制思想，当闭环系统为连续系统时，使前馈环节与闭环系统的传递函数之积为1，从而实现输出完全复现输入。从图7中可以发现，前馈环节的传递函数是被控对象的倒数。那么就是在使用前馈控制前需要对被控对象的模型有了解，才能有针对性的设计出合适的前馈控制器。也就说，每个系统的前馈控制器都是不一样的，每个前馈控制器都是专用的。

五、选择性控制（Selective Control）系统

选择性控制系统也叫超驰控制系统，也可称为自保护系统或软保护系统。选择性控制是把生产过程中对某些工业参数的限制条件所构成的逻辑关系迭加到正常的自动控制系统上去的组合控制方案。系统由正常控制部分和取代控制部分组成，正常情况下正常控制部分工作，取代控制部分不工作；当生产过程某个参数趋于危险极限时但还未进人危险区域时，取代控制部分工作，而正常控制部分不工作，直到生产重新恢复正常，然后正常控制部分又重新工作。这种能自动切换使控制系统在正常和异常情况下均能工作的控制系统叫选择性控制系统。

通常把控制回路中有选择器的控制系统称为选择性控制系统。选择器实现逻辑运算，分为高选器和低选器两类。高选器输出是其输入信号中的高信号，低选器输出是其输入信号中的低信号。根据选择器在系统结构中的位置不同，选择性控制系统可分为两种：

（1）选择器位于两个调节器和一个执行器之间，选择器对两个调节器输出信号进行选择，如图8(a)所示。这种选择性控制系统的主要特点是：两个调节器共用一个执行器。在生产正常情况下，两个调节器的输出信号同时送至选择器，选出正常调节器输出的控制信号送给执行器，实现对生产过程的自动控制，此时取代调节器处于开路状态，对系统不起控制作用。当生产不正常时，通过选择器选出取代调节器代替正常调节器对系统进行控制。此时，正常调节器处于开路状态，对系统不起控制作用。当系统的生产情况恢复正常，通过选择器的自动切换，仍由原正常调节器来控制生产的正常进行。



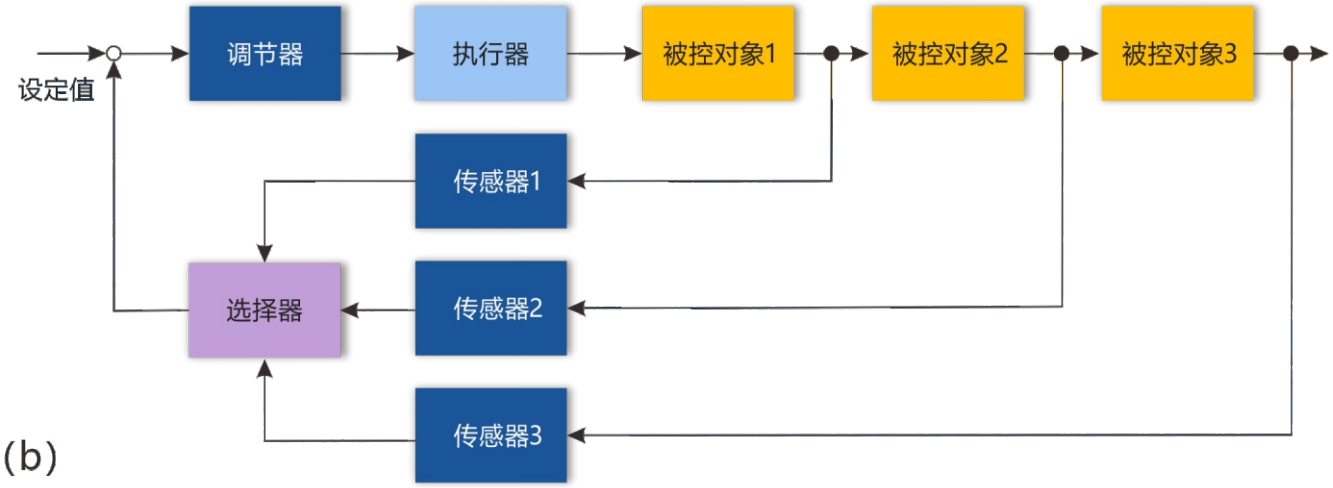


图8 选择性控制系统结构框图

（2）选择器位于调节器之前，对传感器输出信号进行选择的系统，如图8(b)所示。该选择性系统的特点是几个传感器合用一个调节器。通常选择的目的有两个，其一是选出最高或最低测量值；其二是选出可靠测量值。

在图8(a)所示的选择性控制系统中，由于系统中总有一台控制器处于开环状态，因此易产生积分饱和。防积分饱和有限幅法、外反馈法、积分切除法三种。

六、三冲量控制（Three Impulse Control）系统

三冲量控制系统是来自电厂锅炉给水自动调节系统的一个名词，是根据汽包液位、给水流量和蒸汽流量三冲量经PID计算来调节给水阀门开度，从而达到自动控制汽包液位的目的。

所谓冲量，实际就是变量，多冲量控制中的冲量，是指控制系统的测量信号。三冲量控制意味着对三个变量进行测量和控制从而使得其中一个变量达到稳定。

一般而言，如图9所示，三冲量控制系统从结构上来说，是一个带有前馈控制的串级控制系统。以液位控制为例，主调节器（液位控制器）与副调节器（流量控制器）构成串级控制系统。汽包液位（传感器2）是主变量、给水流量（传感器1）是副变量。副变量的引入使系统对给水压力的波动有较强的克服能力。蒸汽流量（传感器3）的波动是引起汽包液位变化的因素，是干扰作用，蒸汽波动时，通过引入前馈调节器，使给水流量（传感器1）作相应的变化，所以这是按干扰进行控制的，是把蒸汽流量信号作为前馈信号引入控制的。

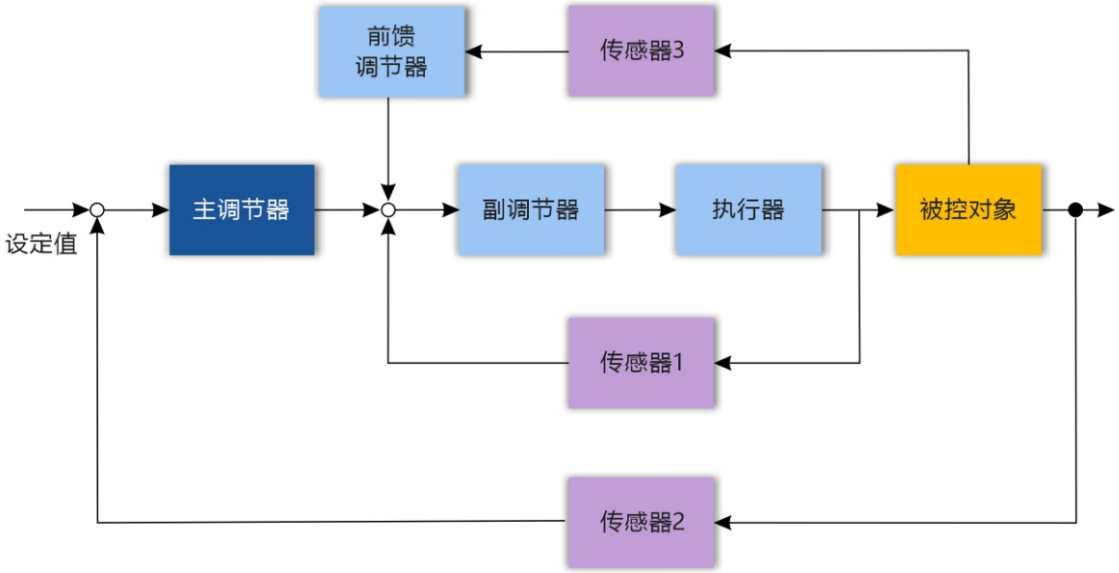


图9 三冲量控制系统结构框图

七、总结

综上所述，在复杂控制系统中可能有几个过程测量值、几个PID控制器以及不止一个执行器；或者尽管主控制回路中被控量、PID控制器和执行器各有一个，但还有其他的过程测量值、运算器或补偿器构成辅助控制系统，这样主、辅控制回路协同完成复杂控制功能。复杂控制系统中有几个闭环回路，因而也是多回路控制系统。

另外，随着技术的进步，越来越多的生产、工艺和设备仪器对自动化控制要求越来越高，对于被控对象比较特殊，被控量不止一个，生产工艺对控制品质的要求比较高或者被控对象特性并不复杂，但控制要求却比较特殊，如超高精度，这些都需要复杂控制系统予以解决。