第十一篇

计算机在选矿工业中的应用

第一章　计算机 DDC 控制系统

第一节　DDC 系统中的各种基本调节规律

一、PID 调节

目前在 DDC 系统中的基本调节规律，仍采用 *PID* 调节规律。选矿过程的 *DDC* 系统也是如此。一般都以模拟调节器的 *PID* 调节规律为基础。

$$u = K_c\left(e + \frac{1}{T_i}\int e\,dt + T_d\frac{de}{dt}\right) \qquad (1-1)$$

DDC 系统控制多个调节回路时，是按一定周期 T，依一定次序轮流进行采样和控制，并用数字量进行计算的。为便于计算机计算，要将公式(1－1)变成差分近似公式。即对上式的积分项，用求和式来进行

$$\int_0^t e\,dt \approx \sum_{i=0}^{n} e_{(i)}\,T$$

式中　$e_{(0)}$、$e_{(1)}$、$e_{(2)}$、$\cdots e_{(n)}$ ——在第 0、T、$2T$、$\cdots$、nT 周期时的偏差值。

微分项用差商来代替，即

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{e_{(n)} - e_{(n-1)}}{T}$$

$$e_{(n)} = x_{0(n)} - x_{(n)}$$

∴在 DDC 系统中 *PID* 调节规律为如下差分式

$$u[n(T)] = u_{(n)} = K_c\left\{e_{(n)} + \frac{T}{T_i}\sum_{i=0}^{n} e_{(i)} + \frac{T_d}{T}[e_{(n)} - e_{(n-1)}]\right\}$$

DDC 系统中的 *PID* 调节规律常用位置式及增量式算法。还可以利和计算机的逻辑判断特点,采用 *PID* 的选择性控制和积分分离算法。

1. 位置式

位置式算式是指该种调节规律的输出 $u_{(n)}$ 对应于执行机构的实际位值(例如阀芯的位置)。其算式为

$$u_{(n)} = K_c\left\{e_{(n)} + \frac{T}{T_i}\sum_{i=0}^{n} e_{(i)} + \frac{T_d}{T}[e_{(n)} - e_{(n-1)}]\right\}$$

设积分系数　$K_i = \frac{T}{T_i}K_c$

微分系数　$K_d = \frac{T_d}{T}K_c$

则

$$u_{(n)} = K_c e_{(n)} + K_i\sum_{i=0}^{n} e_{(i)} + K_d[e_{(n)} - e_{(n-1)}] \qquad (1-2)$$

要按公式(1-2)一一对应计算出 $u_{(n)}$ 值与执行机构的位置,不仅需要计算机对 $e_{(n)}$ 进行累加,而且计算机的任何帮障都会使 $u_{(n)}$ 大幅度变化,对安全生产不利。

2. 增量式

增量式算法,是指其输出值 $\Delta u_{(n)}$,表示此刻执行机构的位置(例如阀芯位置)比原有位置增减的量。其算式是

$$\Delta u_{(n)} = u_{(n)} - u_{(n-1)} \qquad (1-3)$$

根据公式(1-2),对于第($n-1$)次采样时的控制算法为

$$u_{(n-1)} = K_c e_{(n-1)} + K_i\sum_{i=0}^{n-1} e_{(i)} + K_d[e_{(n-1)} - e_{(n-2)}] \qquad (1-4)$$

将公式(1-2)、(1-4)代入公式(1-3)得

$$\Delta u_{(n)} = K_c[e_{(n)} - e_{(n-1)}] + K_i e_{(n)} + K_d[e_{(n)} - 2e_{(n-1)} + e_{(n-2)}] \qquad (1-5)$$

公式(1-5)即为 DDC 的增量方程式。计算机将计算的结果 $\Delta u_{(n)}$ 经变换后,输出给执行机构。执行机构将根据这一信号数值的正负和大小,决定调节作用的增减及大小(例如,决定应将阀门开大还是关小及变化的量有多大)。

增量式输出的优点是:(1)计算机只输出增量,误动作时对生产影响小,必要时可加逻辑保护;(2)手动-自动切换时冲击小;(3)算式中不需要累加,增量只与最近几次采样值有关,容易获得较好的效果。(4)所占内存容量少些。

所以目前 DDC 系统用 *PID* 调节增量式算法较多。

3. 选择性控制和积分分离算法

(1)选择性控制　是为防止生产过程发生意外事故或对不同的工艺条件范围需要不同调节规律的情况下使用的一种控制方法。

选择性控制的核心是一个逻辑判断环节,一般由两个相互独立的调节回路及一个逻辑判断环节组成。当生产过程的被调量处于正常范围时,由正常控制回路进行控制;当被调量处于极限状态时,则正常的控制回路断开,由事故处理控制回路进行控制。

例如在磨机给矿量定值控制中,在正常处理量以内采用 *PI* 算法。而由于某种原因使矿量增大到极限 q_m 时,即 $q_m(n)-q(n)\leqslant 0$ 时($q(n)$为实际处理量),选择性控制就自动选择比例调节算法,并且取比例增益 K_m 比正常 *PI* 调节的比例增益 K_p 更大。这样可使给矿量迅速恢复到正常处理量范围以内。当处理量恢复到正常范围时,即 $q_m(n)-q(n)>0$ 时,控制系统又启动选择正常的 *PI* 控制。选择控制原理见图 11-1-1。控制程序框图见图 11-1-2。

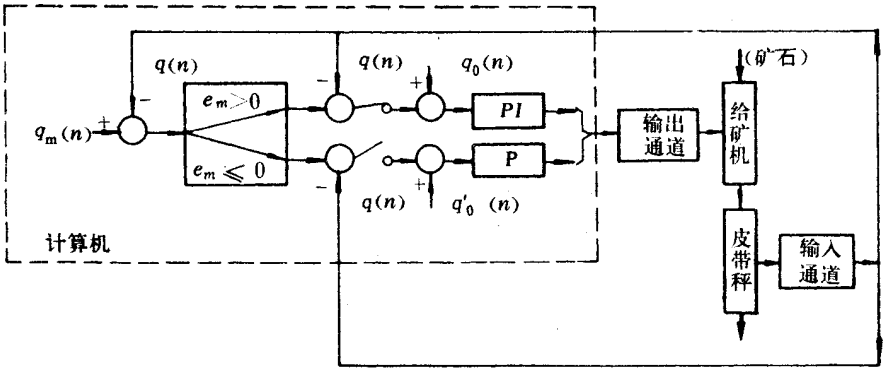


图 11-1-1　选择性控制示意图

$q_0(n)$—处理量正常给定值;

$q_m(n)$—允许的最大处理量;

$q'_0(n)$—处理量事故给定值;

$q(n)$—处理量测量值;

e_m—处理量上限与实际处理量之间的偏差,即

$$e_m = q_m(n) - q(n)$$

选择性控制起初仅用于安全操作,目前已使用得愈来愈广泛:用于要求各种不同工艺条件的情况,需要选择不同的调节规律或要选择不同的控制算式系数或要选择不同的

模型系数等情况。它已发展成为具有逻辑适应性的选择性控制。

(2)积分分离算法　积分分离算法是另一种选择性控制算法。其算式为

$$u_{(n)} = K_c e_{(n)} + K_1 K_i \sum_{i=0}^{n} e_{(i)} + K_d [e_{(n)} - e_{(n-1)}] \qquad (1-6)$$

$$K_1 = \begin{cases} 1 & \text{当} \ |e_{(i)}| \leqslant A \\ 0 & |e_{(i)}| > A \end{cases}$$

式中　K_1——逻辑系数；

A——预定偏差极限值。

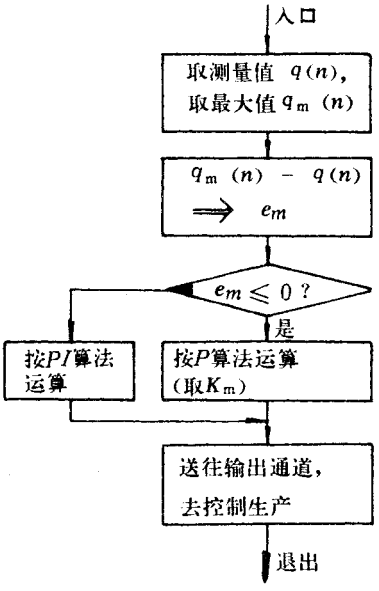


图 11-1-2　选择性控制程序框图

这种算法是利用计算机的逻辑判断能力，来减小在偏差 $e_{(n)}$ 较大时，可能出现的较大的超调现象，使调节性能得到改善。

若按公式(1-2)调节，在偏差 $e_{(n)}$ 较大时，右边第二项(近似积分项)的值很大，导致调节过程超调量过大，使调节过程动态品质变坏。而采用公式(1-6)的积分分离算法调节，则在偏差 $e_{(n)} > A$ 时，$K_1 = 0$，此时积分项不起作用，变成了 PD 算法，能较迅速地克服偏差。通过 PD 调节，当 $e_{(n)} \leqslant A$ 时，$K_1 = 1$，积分项又重新起作用，又变成 PID 调节。这种算法既能较迅速地克服偏差，超调量又小，又无余差，因此调节过程的静、动态品质都得到改善(见图 11-1-3)。这是模拟仪表 PID 调节无法实现的。

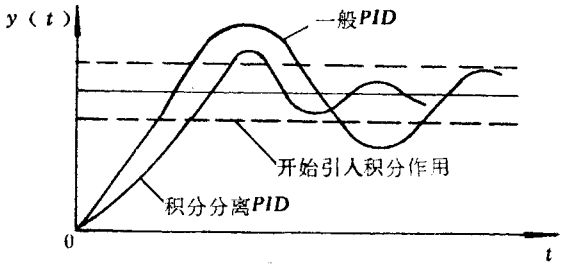


图 11－1－3　积分分离 *PID* 调节过程

二、比值调节

DDC 比值调节算法和模拟仪表的比值调节规律一样，其输出 u 与输入 x 成比例。不同的是考虑到在实际控制中，比值调节的输出往往是作为副回路的给定值，它将在计算机内部直接参加运算，所以还要将比值调节的输出进行量化。

$$SP = \frac{K_x}{K_m q} \tag{1-7}$$

为了量化计算方便，设

$$q = \frac{q_{主m}}{2^N - 1}$$

式中　SP——量化后的比值调节输出；

x——主物料量；

K——比值；

K_m——主物料传感器输入和输出的比值；

q——主物料量化单位（基本数量）；

$q_{主m}$——主物料量的最大极限值。

例　某开路磨矿的磨机比例加水调节系统（见图 11－1－4），给矿量极限值是 100t/h，皮带秤信号范围为 0～5V，要求的液固比 $K = 15/85$，此刻的实际处理量 $q(t)$ 为 80t/h，要求按给矿比例控制补加水水量。在这个问题中，经量化后的水阀给定值为 $W_0(n)$

$$W_0(n) = \frac{Kq(t)}{K_m q} = \frac{15}{85} \times \frac{5}{100} \times \frac{10^2}{1.96} \times 80 \approx 36_{(10)} = 100100_{(2)}$$

即此时磨机补加水量的给定值是二进制数 100100。

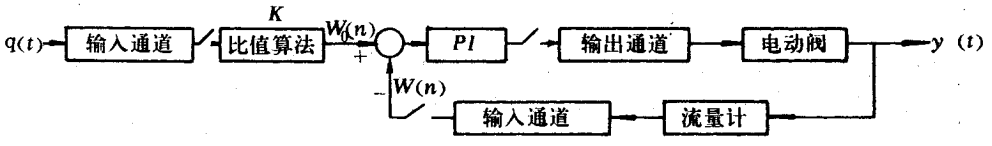


图 11－1－4　磨机比例给水控制框图

三、串级调节

与模拟仪表调节一样，DDC 串级调节系统也适用于主参数与若干副参数有关联的情况。串级调节由若干级组成。串级调节的特点是副回路的给定值是主回路调节算法的结果。因此作为串级调节算法的结果，一定是绝对值型的。

DDC 系统串级调节过程包括读入测量值，完成 *PID* 计算及运算结果输出。串级调节的程序框图见图 11－1－16。

四、前馈调节

与模拟仪表调节一样，前馈调节是一种按照扰动并考虑干扰通道和调节通道静、动态特性的开环调节系统。前馈调节可以是静态的，也可以是动态的。

静态前馈调节算法的基础是仅考虑干扰作用与调节作用和被调量之间量的关系，而不考虑时间的因素。静态前馈算法一般是代数式的数学模型。最简单的静态前馈模型是比值调节的比值（比值调节是前馈调节的特例）。当干扰作用与调节作用及被调量之间的关系较复杂时，就要建立复杂的代数关系式作静态前馈调节的模型。对于各种不同的关系有各种不同的前馈模型。

静态前馈调节　例如，有一种磨矿浓度控制方案，是用功率变送器测量分级机电机的负荷来间接测量返砂量，用皮带秤测量磨机处理量。可以使用一种多元静态模型式（1－8）作为前馈模型，来描述磨机补加水量与给矿量、功率变送器信号值、所要求达到的控制浓度、原矿含水量及返砂含水量之间的关系，并按图（11－1－5）的控制系统对磨矿浓度进行静态前馈控制。

$$W_0(t)=[R(1-\alpha)-\alpha]q_0(t)+[R-R_1][bx(t)+\alpha] \qquad (1-8)$$

式中　$W_0(t)$——磨机需要的补加水量，t/h；

R——磨机内液固比；

α——原矿含水量，%；

R_1——返砂中的液固比；

$q_0(t)$——包括水分的原矿处理量，t/h；

$x(t)$——轴功率输出的标准信号，mA；

a、b——系数。

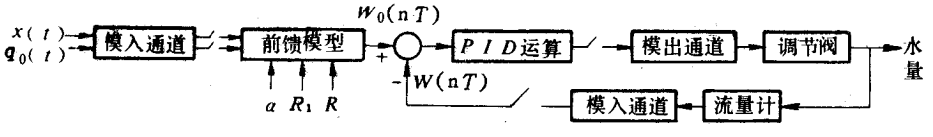


图 11－1－5　磨矿浓度静态前馈控制框图

动态前馈调节　如果调节对象或调节通道的滞后(惯性滞后及纯滞后)比较大,则静态前馈调节的质量就比较差。此时,必须采用动态补偿前馈调节。采用动态前馈调节取得成功的关键是正确地进行动态补偿。

目前对于化工、选矿等类型的工艺过程,大都采用一个一阶环节加一个纯滞后或两个一阶环节加一个纯滞后来近似过程输出与输入之间的动态关系,其传递函数可近似为

$$G(s)=\frac{Ke^{-\tau_0 s}}{T_0 s+1}$$

及

$$G(s)=\frac{Ke^{-\tau_0 s}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$$

式中　K——静态放大系数。

动态补偿前馈调节以双通道原理为基础,即干扰作用经干扰通道作用于被调量;调节作用经调节通道作用于被调量。但干扰、调节两通道的静、动态特性往往不一样,为了使调节作用有效地抵消干扰作用的影响,必须制定出将两通道的静、动态特性都考虑进去的动态前馈调节模型(见图 11－1－6)。

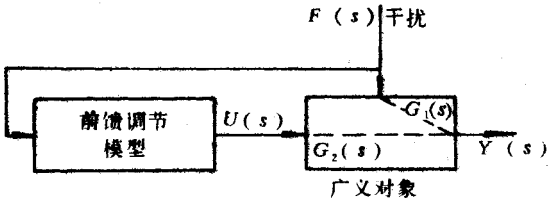


图 11－1－6　前馈调节示意图

假设,干扰通道的传递函数为 $G_1(s)$,并且

$$G_1(s)=\frac{Y_1(s)}{F(s)}=\frac{K_1}{T_{01}s+1}e^{-\tau_{01}s} \tag{1-9}$$

假设,调节通道的传递函数为 $G_2(s)$,并且

$$G_2(s)=\frac{Y_2(s)}{U(s)}=\frac{K_2}{T_{02}s+1}e^{-\tau_{02}s} \tag{1-10}$$

式中　$Y_1(s)$——由干扰作用引起的被调量变化的拉氏变换式;

$Y_2(s)$——由调节作用引起的被调量变化的拉氏变换式;

$F(s)$——干扰作用的拉氏变换式;

$U(s)$——调节作用的拉氏变换式;

T_{01}——干扰通道的时间常数;

T_{02}——调节通道的时间常数;

K_1——干扰通道的静态放大系数；

K_2——调节通道的静态放大系数；

τ_{01}——干扰通道的纯滞后时间；

τ_{02}——调节通道的纯滞后时间。

为了使调节作用能充分抵消干扰作用，必须使调节作用对被调量的影响等于干扰作用对被调量的影响，即

$$Y_1(s) = -Y_2(s) \tag{1-11}$$

将公式(1-9)、(1-10)代入公式(1-11)得

$$F(s)G_1(s) + G_2(s)U(s) = 0$$

$$\frac{U(s)}{F(s)} = -\frac{G_1(s)}{G_2(s)}$$

设

$$W(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = -\frac{G_1(s)}{G_2(s)} \tag{1-12}$$

式中　$W(s)$——调节通道对干扰通道间的传递函数。

将公式(1-9)、(1-10)代入公式(1-12)则

$$W(s) = -\frac{(T_{02}s+1)K_1 e^{-\tau_{01}s}}{(T_{01}s+1)K_2 e^{-\tau_{02}s}} \tag{1-13}$$

公式(1-13)即为前馈调节的动态模型。该式是个连续函数，而控制机处理的是离散信号，因此必须通过 Z 变换将公式(1-13)变成差分方程，才能为计算机所接受。

设

$$\tau_{01} = m_1 T$$

$$\tau_{02} = m_2 T$$

式中　m_1、m_2——相应通道的采样周期数。

查 Z 变换表知公式(1-13)的 Z 变换式为

$$W(z) = \frac{U(z)}{F(z)} = -\frac{z^{-m_1}K_1 z}{z^{-m_2}T_{01}(z - e^{-T/T_{01}})} \times \frac{T_{02}(z - e^{T/T_{02}})}{K_2 z}$$

$$= -z^{(m_2-m_1)}\frac{K_1 T_{02}(z - e^{-T/T_{02}})}{K_2 T_{01}(z - e^{T/T_{01}})} \tag{1-14}$$

设

$$m = m_1 - m_2$$

$$K = \frac{K_1 T_{02}}{K_2 T_{01}}$$

则公式(1-14)变为

$$\frac{U(z)}{F(z)} = -z^{-m}K\frac{(1 - e^{-T/T_{02}}Z^{-1})}{(1 - e^{-T/T_{01}}Z^{-1})} \tag{1-15}$$

将公式(1－15)通过 Z 反变换为

$$U(n) - e^{-T/T_{01}} U(n-1) = -KF(n-m) + K - e^{-T/T_{02}} F(n-m-1) \quad (1-16)$$

设

$$A = e^{-T/T_{01}} \text{；} B = K \text{；} C = Ke^{-T/T_{02}}$$

则公式(1－16)为

$$U(n) = AU(n-1) - BF(n-m) + CF(n-m-1) \quad (1-17)$$

公式(1－17)就是动态补偿前馈控制的差分方程。

因 DDC 系统一般采用增量式输出，故需将公式(1－17)写成相邻两次控制的差值

$$\therefore \quad \Delta U(n) = A[U(n-1) - U(n-2)] - BF(n-m) + (B+C)F(n-m-1) - CF(n-m-2) \quad (1-18)$$

公式(1－18)就是动态补偿前馈控制的增量输出差分方程。

前馈加反馈控制　适于要求控制精度高的对象，如图 11－1－7 所示。其中前馈模型类似公式(1－18)。这是一个浮选槽液位前馈加反馈控制系统。

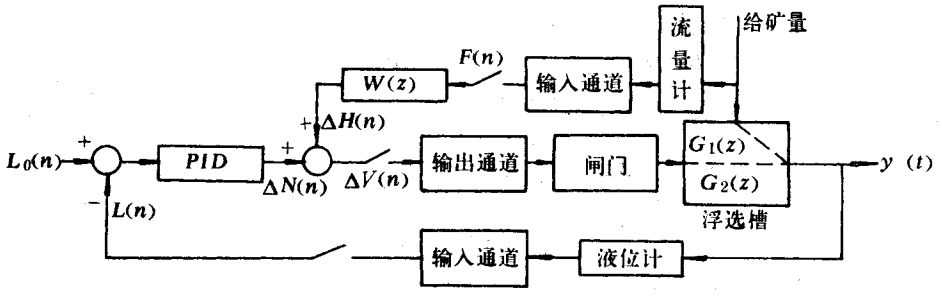


图 11－1－7　浮选槽液位前馈加反馈控制框图

y—浮选槽液位实际值；L—浮选槽液位测量值；

L_0—浮选槽液位给定值；F—矿浆输入量；

H—浮选槽闸门前馈控制作用量；N—浮选槽闸门 PID 控制作用量；

V—浮选槽闸门总控制作用量；$W(z)$—调节通道 Z 变换传递函数

该前馈加反馈控制系统的控制计算程序见图 11－1－8。其计算步骤如下：

1. 计算反馈调节系统的偏差 $e(n)$：

$$e(n) = L_0(n) - L(n)$$

2. 计算 PID 调节模型的输入增量 $\Delta N(n)$；

3. 计算前馈控制模型的输出增量 $\Delta H(n)$；

4. 计算加法器的增量输出；

$$\Delta V(n) = \Delta N(n) + \Delta H(n)$$

5. 将增量输出 $\Delta V(n)$，经数/模转换器转换成连续的模拟量信号，去直接控制执行机构，完成对被调量的调节。

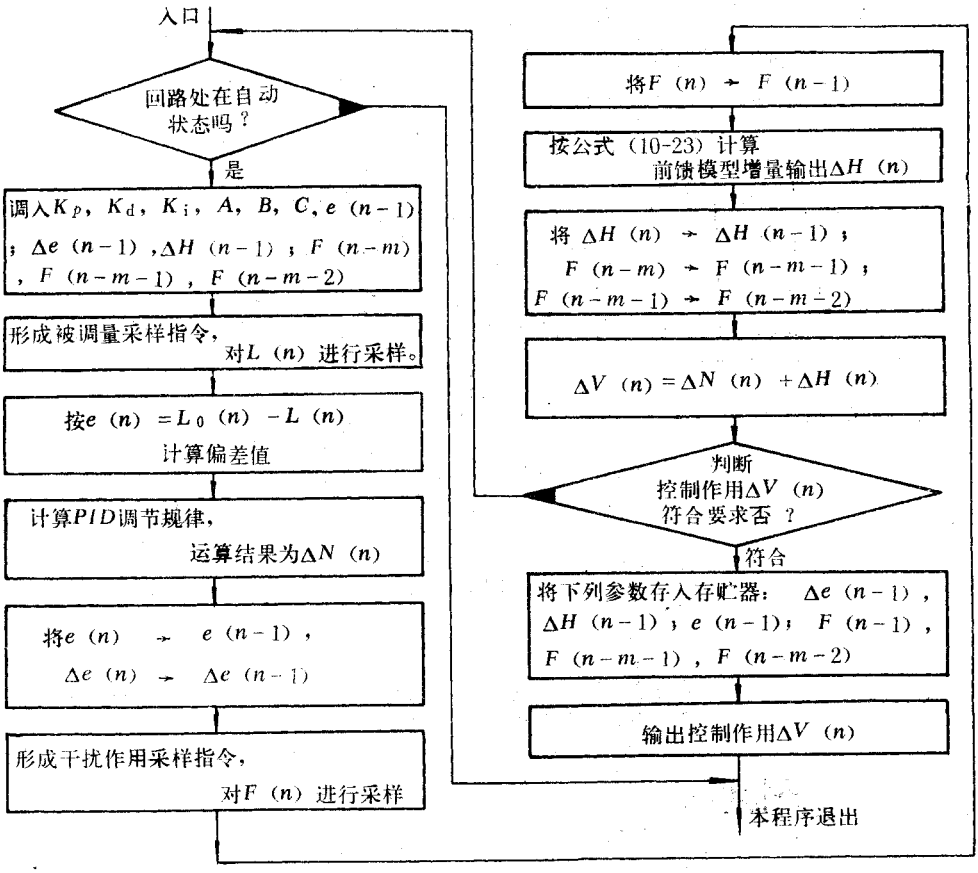


图 11－1－8　前馈加反馈调节计算程序框图

第二节　选矿过程 DDC 系统举例

计算机的控制作用是依靠软件来实现的。在控制过程中，调度系统调度各应用程序。各程序频繁地与数组文件（以后简称文件）打交道，从中获取控制过程所必须的信息，并把生产过程的有关参数及控制过程的各种状态存入有关文件中。使计算机能有条不紊地协调控制过程各动作，实现对生产过程的自动控制。不同的计算机，不同的控制系统，有不同的软件结构。下面例举一个 DDC 系统的例子，说明上述控制过程。

一、概况

某选厂处理的矿石以黄铜矿为主，综合回收磁铁矿和黄铁矿。采用先浮选，后磁选

的流程。浮选采用先部分浮选铜，再混合浮选铜－硫，然后进行铜－硫分离的流程。用计算机对磨矿、浮选作业进行直接数字控制。

该厂的 DDC 系统，主要是对工艺参数进行定值控制和前馈控制，采用 PID 算法、串级控制算法、比值调节算法等。DDC 系统采用三台 PDP－11/03 计算机，每台内存为 32k 字。其中两台作为测量、控制计算、报警用，即测量控制站 MC_1 站和 MC_2 站。另一台作为显示站，称 DS 站，显示各控制回路的状态、给定值、测量值、进行人－机对话、修改控制回路参数等（见图 11－1－9）。MC_1 站负责磨矿系统和浮选给药量的测量控制，共有 62 个基本控制回路。MC_2 站负责浮选槽液位、充气量的测量和控制，共有 89 个基本控制回路。总共有 151 个基本控制回路。

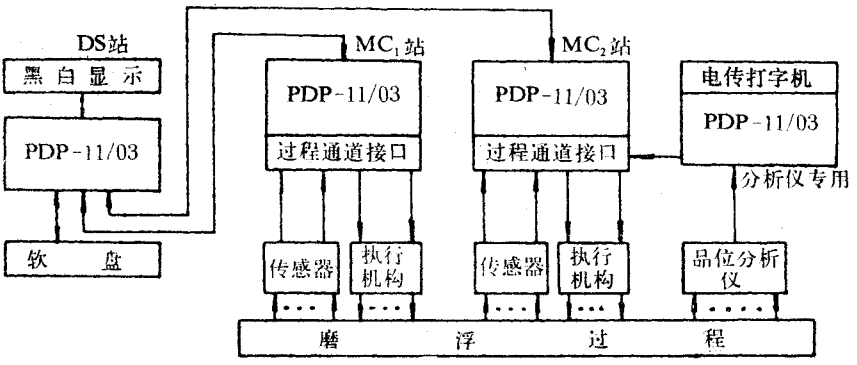


图 11－1－9　DDC 系统结构图

磨矿循环的控制目的，是在恒定处理量的前提下，使磨矿循环最终产品的粒度和浓度保持均匀稳定。其主要被调量是处理量、矿浆浓度和细度。控制变量主要是给矿量、加水量、砾磨机砾石添加量等（见图 11－1－10）。

浮选作业的控制目标，是在保证精矿品位合格的前提下，获得尽可能高的回收率。其主要被调量是有关作业的精矿品位和分离浮选的精选尾矿品位、pH 值。主要调节变量是浮选槽液位，浮选矿浆充气量，黄药、松油用量，石灰乳添加量等。见图 11－1－11。

该调节系统的输入变量中，既有模拟量，也有数字量。除 X 射线荧光分析仪外，生产过程参数测扯值大都是模拟量。X 射线荧光的测量值是经专用计算机处理后的数值，所以是数字量。一些开关量也是数字量。这些数字量由数字量通道输入，模拟量由模拟量输入通道输入，转换成数字量。该 DDC 系统的输出，主要是数字量输出，只有控制给矿机变频调速的输出信号是模拟量信号。该系统输出的特点是，把调节作用量 Δu 转换成脉冲数，每个脉冲周期是 40ms，因此脉冲数输出也就是控制作用时间输出。用脉冲数去控制执行机构的继电器开关的接通时间（执行机构动作时间正比于执行机构的动作量），

根据脉冲的符号决定执行机构的正反转。所以大量的控制输出为数字量输出，使用数字量输出通道、输出设备简单，但调节的精确度差一些。

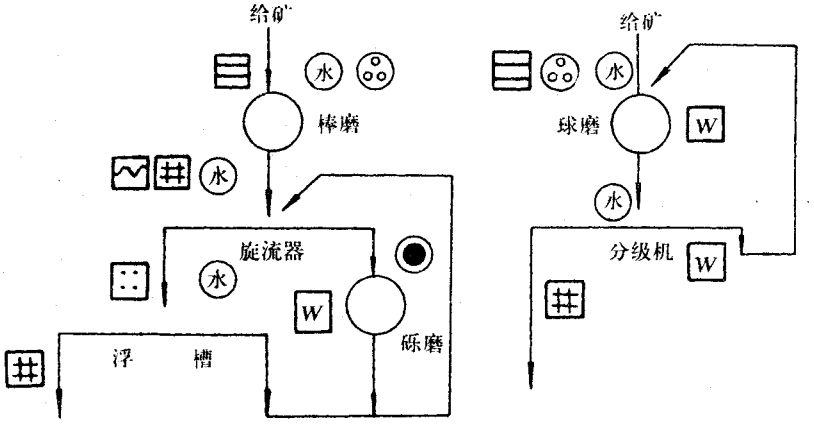


图 11－1－10　磨矿循环主要控制点分布

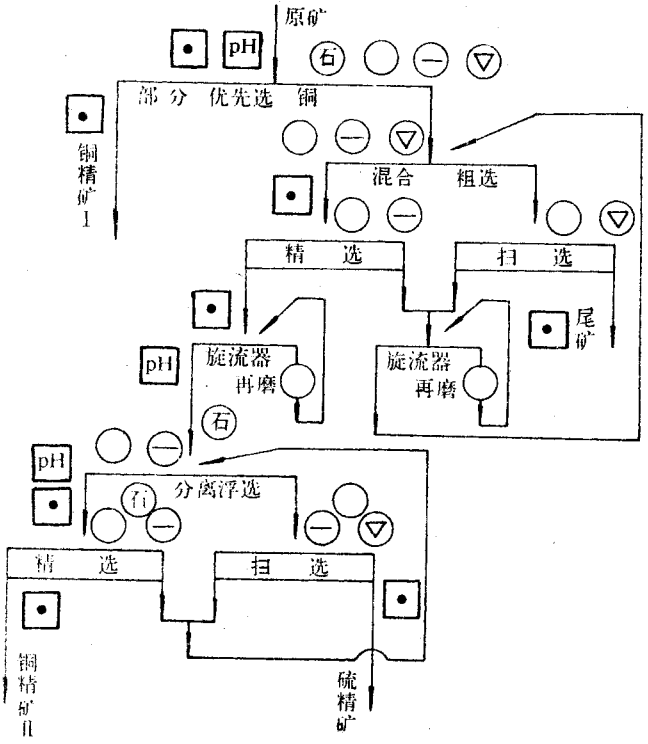


图 11－1－11　浮选过程主要控制点分布

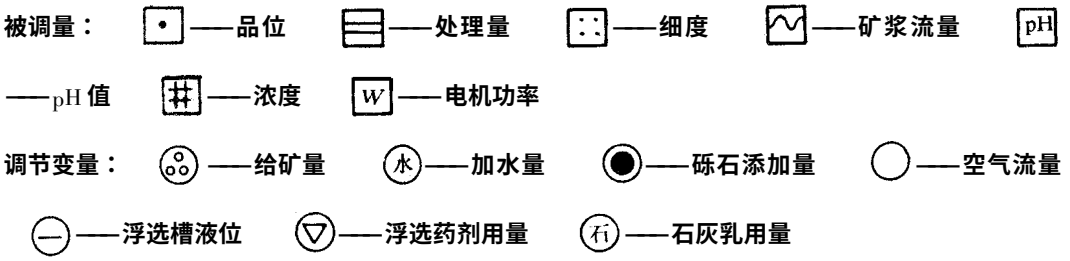


图 11－1－10 和图 11－1－11 的图例

二、软件组成

泫 DDC 系统的控制软件，由操作系统 RSX－11S、模拟量测量主程序、主控程序、控制功能子程序、驱动程序及数组文件等构成。

（数组）文件　在计算机内存中开辟一个专门存放各种数据信息的区域，再根据信息类型的不同又把该区域划分为存放各种不同数据信息的区间，并分别冠以专用名字。

该 DDC 系统的（数组）文件，有从地址 120000 开始的 8k 字内存，分为大小不等、格式各异的 19 个数组文件。其中主控程序及控制功能子程序需要访问的有下列数组文件，分别叫做 ISC、ITI、ICP、IAP、IMT、ISP、IDO、IBU 和 TRT 数组文件。在 ISC 数组文件（以下简称 ISC，其余类推）中，存放控制过程的通用参数，例如采样间隔、控制间隔、系统控制是否在线等信息。在 ITI 中存放测量和控制变量状态信息，例如某变量是否在线，偏差值是否超过极限值等。在 ICP 中存放各控制回路所采用的算法及其控制参数、控制回路的输入变量号、控制输出的号序等。在 IAP 中存放模拟量输入信号的处理参数。例如该模拟量是否要线性化（非线性的近似线性处理），如何线性化等。在 IMT 中存放各测量结果。在 ISP 中存放各控制回路的给定值和控制回路的输出值。在 IDO 中存放已经转换成脉冲数的控制回路输出量（即控制回路输出的脉冲数）。在 IBU 中存放报警信息。在 TRT 中暂存计算变量。

操作系统 RSX－11S：统一管理计算机中各种形式的作业，负责对计算机进行输入/输出管理，CPU 管理，存贮管理和文件管理等。

主控程序　在操作系统 RSX－11S 的操纵管理下，有条不紊地对 151 个控制问路的采样、运算、输出、执行控制、进行调度，以完成对工艺过程的自动调节。该系统对控制回路的调度是根据时间间隔调度和顺序调度两个原则来进行的。在所有的控制回路中，控制间隔可分别为下列十种之一，3s、6s、30s、1min、……、10min（都是 3s 的倍数）。把相同控制间隔的控制回路归为一类。先控制周期短的回路，后控制周期长的回路。而对周期相等的控制回路，则又根据工艺特点编成顺序号，按号顺序控制。

控制功能子程序　受主控程序调度，具体完成调节规律运算，运算结果输出和运算偏差报警等。共有 7 个子程序。其中 5 个是算法子程序，即 *PID* 及串级控制算法子程序，比例算法子程序，专用算法子程序，前馈算法子程序，超前－滞后算法子程序，它们直接受主控程序调度。而偏差报警子程序受 *PID* 算法子程序控制。串级输出子程序受除 *PID* 算法子程序以外的算法子程序调用（见图 11－1－12）。比例、专用、前馈、超前－滞后四种算法子程序的计算值输出都不是调节作用量，一般是另一个控制回路的给定值。这些子程序的计算结果需由串级输出子程序处理后，送入 ISP 中，供相应回路调用。报警子程序用于检查在 *PID* 算法子程序执行过程中，偏差值等参数是否超出规定范围。若超出规定范围，需要给出报警信息时，该子程序就调用另一条子程序，把报警信息存入 IBU 数组文件中以备用。

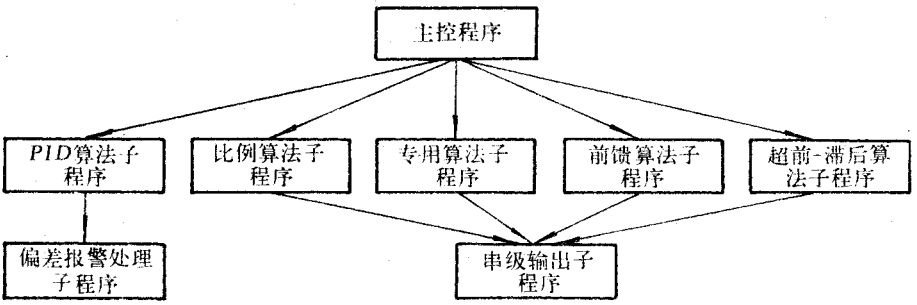


图 11－1－12　主控程序与控制功能子程序联系图

模拟量测量和计算变量主程序　（以下简称测量主程序）　该程序受操作系统控制并定时启动。测量主程序被启动后，根据测量点的类型（测量值和计算变量等）、检测时间间隔及检测顺序来安排逐个测量。把生产过程的测量信号采入计算机，存入 IMT 中，把计算变量（即那些需经过计算处理后方能使用的变量值）存入 TRT 中。

驱动程序　寻找各个时刻应该进行控制的通道号，即寻找输出地址，找到输出地址后，就从 IDO 数组文件中取出控制输出脉冲数，启动该地址所对应控制回路的执行机构继电器，操纵执行机构动作，完成调节任务。

三、DDC 系统操作过程

综上所述，该 DDC 系统的控制过程是：常驻内存的 RSX－11S 操作系统定时地启动测量主程序、主控程序等。这些程序根据需要调用各种功能子程序。在控制过程中各程序频繁地与各有关数组文件交换信息（见图 11－1－13），以完成对生产过程的采样、控制规律运算和控制操作。

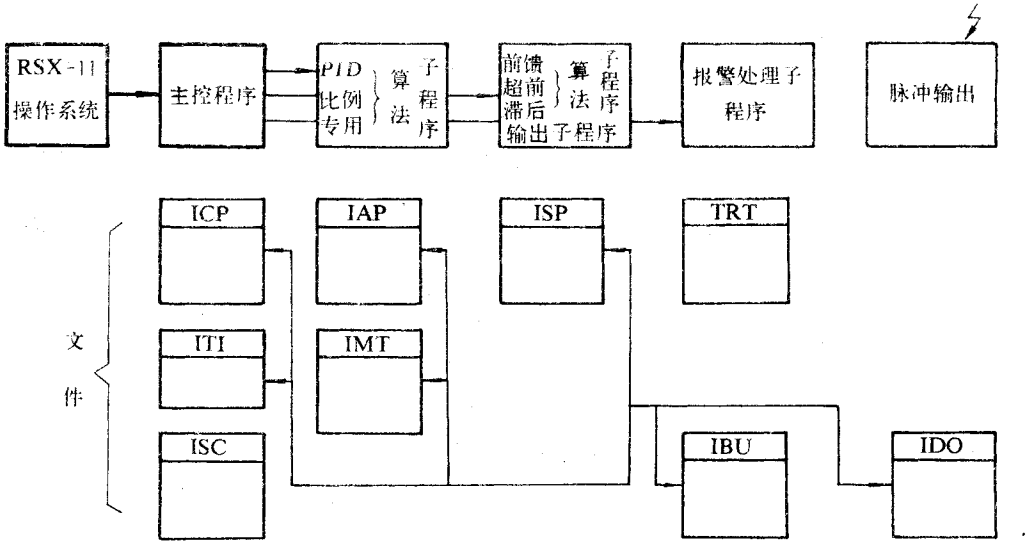


图 11－1－13　各程序与有关数组文件交换信息图

现以该选厂球磨机磨矿浓度比例串级控制系统为例，其控制框图见图 11－1－14，图中 2220－2222 是控制回路编号，该厂的 151 个控制回路都统一编号。q 和 W 都是计算变量

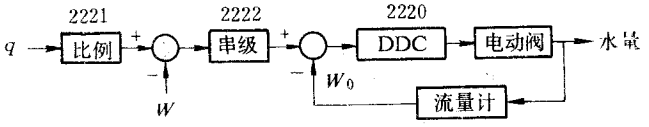


图 11－1－14　球磨机磨矿浓度控制框图

$$q(t) = q_0(t)(1-\alpha) + AZ(t) - B$$

$$W(t) = \alpha q_0(t) + [CZ(t) - D]\frac{\beta}{100-\beta} + W_0(t)$$

式中　$q(t)$——磨机总给矿干矿量，t/h；

$W(t)$——磨机所需的总水量，t/h；

$q_0(t)$——新给矿量(皮带秤测量值)，t/h；

α——原矿水分，%；

β——返砂水分，%；

$Z(t)$——返砂量信号；

$W_0(t)$——加水量，t/h；

A、B、C、D——系数。

操作系统 RSX－11S 周期性地启动测量主程序。通过巡回检测，把生产过程的模拟测量值 q_0、W_0 采入计算机，存入 IMT 数组文件中。然后测量主程序调用变量计算子程序进行计算，将计算结果 q、W 存入 TRT 数组文件中。操作系统每隔 3s 钟启动主控程序一次（主控程序见图 11－1－15），对控制周期（从短周期到长周期）进行扫描。当扫描到 3s，并按控制顺序轮到 2220 回路控制时，主控程序访问 ITI 文件。查询该控制回路的测量值是否处于在线状态或报警状态。如果该回路不处于在线状态或处于报警状态，则都暂不进行控制。如果是在线，但不处于报警状态，则主控程序访问 ICP 文件，得知 2220 回路是 DDC 回路，主控程序就调用 *PID* 算法子程序。

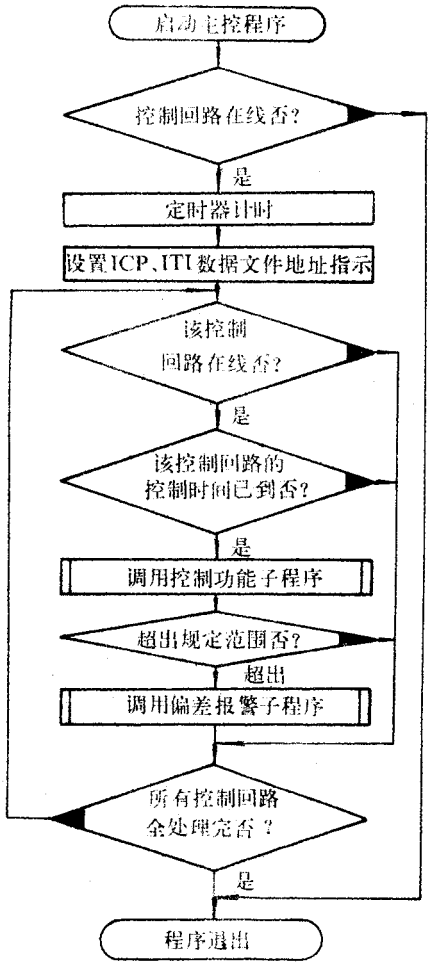


图 11－1－15　主控程序框图

由主控程序启动 *PID* 算法子程序后，程序运行如下（见图 11－1－16）：

1. 判断过程变量是否准备好（即测量值是否收集好了）。如果未准备好，则不能进行 DDC 控制，不能进行 *PID* 运算。此时如果已有增量输出，就要加以清除。

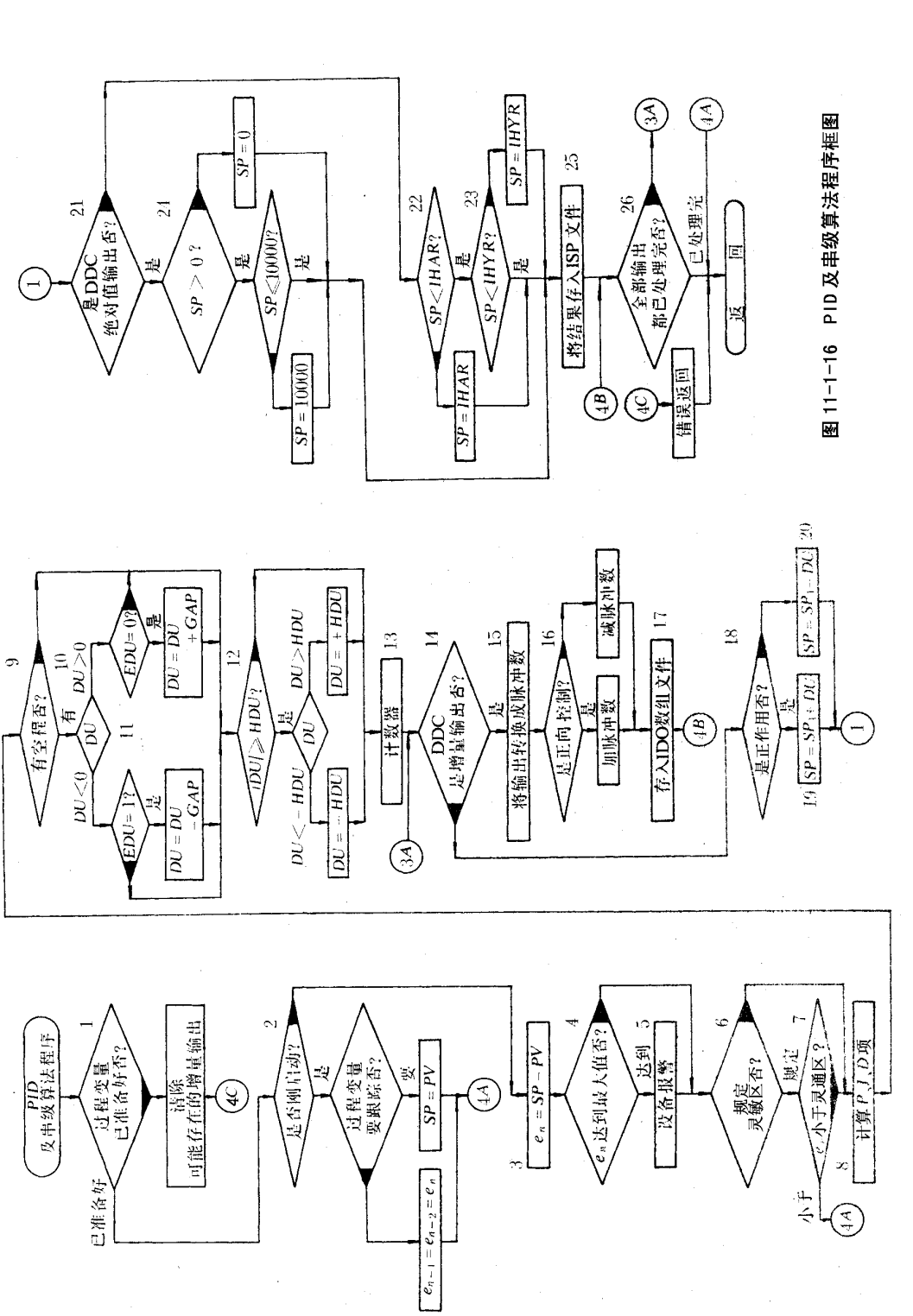


图 11-1-16　PID 及串级算法程序框图

2. 如果测量值已准备好了，就要判断一下，该作业是否是刚刚启动。如果是刚刚启动，就要安置初始值，首先要了解一下它是否要求跟踪。如果要求跟踪，则该给定值（SP）跟踪测量值（PV）的变化，即 $SP = PV$。如果不要求跟踪，则置

$$e_{n-2} = e_{n-1} = e_n$$

即将最近算出的 e_n 作为前两个周期的偏差值 e_{n-1}、e_{n-2}。

3. 如果过程不是刚刚启动（即是在正常生产过程中），就要计算偏差值 $e_n = SP - PV$。

4. 计算出偏差值后，要检查该偏差值是否是最大偏差值。

5. 如果是最大偏差值，就要进行报警。

6. 如果偏差未达到最大值，就要检查执行机构是否有不灵敏区。

7. 如有不灵敏区，则要检查偏差值是否在不灵敏区内，如果给定值与测定值之偏差值比灵敏区还小，则不必进行 PID 运算。即偏差太小，不必予以调节。

8. 如果偏差 e 大于或等于不灵敏区，则进行 PID 的运算。

9. PID 运算后，要了解一下该控制环中的有关仪表设备中是否有空程。

10. 如果有空程，则要判断算出的结果 DU（控制作用量——PID 的输出）是正值还是负值。判断 DU 的正、负后，要了解前一周期的控制方向是正还是负（$EDU = 0$，表示前一周期的控制方向是正；$EDU = 1$，表示前一周期控制方向是负）。

11. 如果这次运算的结果与上一周期的控制方向相同，则空程不会影响到调节作用。如果这次运算结果与上一次的调节方向不一致，就要在原运算结果的基础上加（或减）一个空程 GAP（视 DU 的符号确定是加还是减）。

12. 考虑过空程的影响后，要检查调节作用 DU 的绝对值是否大于或等于所规定调节作用的增量高限 HDU，如果 $|DU| \geqslant HDU$，则取 $DU = \pm HDU$。

13. 至此 PID 运算结果处理完毕，计数器增加一次计数。

14. 要了解该控制环的 PID 算法的输出，是增量输出，还是绝对值输出。

15. 如果是增量输出，则要将运算结果（无量纲的二进制），按公式（1－19）转换为脉冲数。

$$\text{脉冲数} = \frac{\text{执行机构全量程时间} \times \text{控制作用占全量程的万分之几}}{\text{一个脉冲周期的时间}} \qquad (1-19)$$

计算机算出的控制作用以 0～10000 无量纲的数表示，该计算机的脉冲间隔是 20ms，脉冲宽度也是 20ms。如果该回路的全量程时间 $T = 20\text{s}$，假设算出的控制作用 $A = 352$，则按公式（1－19）算出该控制作用的脉冲数

$$\text{脉冲数} = \frac{T \times 1000 \times A}{(20+20) \times 10000} = \frac{20 \times 1000 \times 352}{40 \times 10000} = 17.6 \approx 17$$

16. 判断该回路是正向作用，还是反向作用。如果是正向作用，就把计算出的脉冲数保持原来的符号。如果是反向作用，则把计算出的脉冲数反号。

17. 将计算出的控制作用脉冲数，存于专门的数组文件 IDO 中，供调节时取用。

18. 如果不是增量输出，也要判断是正向作用，还是反向作用。

19. 如果是正向作用，则将此次计算出的结果（控制作用量）DU 加上原来的给定值状态 SP_1，作为这次控制所要达到的绝对值。

20. 如果是反向作用，则将原来给定值的状态 SP_1 减去 DU，作为这次控制要达到的绝对值。

21. 判断该计算结果是作为串级控制的输出，还是作为绝对值的输出。

22. 如果是作为串级输出，则要检查该输出作用是否是在副环的过程变量的允许范围之内。

23. 如果超出了允许范围，则取其边界值作副环的给定值。

24. 如果是作为绝对值输出，要判断该绝对值是否是在 0 ~ 10000 之间，如超出此限，则取其边界值作为绝对值输出。

25. 将 22、23 和 24 的结果存入 ISP 数组文件中，以供调节时取用。

26. 有时一个控制输出信号，同时是几个环节（执行机构或副回路）的输入。因此完成一次控制运算（输出）后，要判断是否所有输出都已处理过了，若都已处理了，则该子程序退出。

主控程序接着处理 3s 控制周期的其它回路。当 3s 周期控制回路全部处理完后，转向处理 6s 周期的控制回路，按照从大号序到小号序的顺序进行控制。在该浓度控制回路中，2220 回路的控制周期是 3s 而 2222 和 2221 回路都是 6s。然后先对 2222 回路进行控制运算，其步骤同上。不同的是 2222 回路是串级控制的主回路，其 PID 算法的结果不是控制作用量，而是 2220 回路的给定值，所以计算结果送往 ISP 文件中去，供下一周期 2220 回路进行控制运算时取用。然后紧接着对 2221 比值控制回路进行控制运算，它与 2222 回路的不同点仅在于控制算法的不同，其算法原则框图见图 11 - 1 - 17。该比值算法的结果，由比值算法子程序调用输出子程序，送往 ISP 文件，供下一个周期的 2222 回路控制时取用。然后主控程序又去执行对其它回路的控制运算。直到所有回路全部控制运算处理完毕，主控程序退出，等待下一周期操作系统的启动。

驱动程序对输出地址进行扫描。当扫描轮到 2220 回路的控制输出时，驱动程序从 IDO 文件中，取出 2220 回路的控制作用脉冲数。通过输出通道去接通 2220 回路电动调节阀的相应（正或反向）继电器开关，使电动阀按指令所指定的方向旋转。其旋转时间，等于输出脉冲数乘以脉冲周期，这样就完成了一次水量调节。在下一个 3s 控制周期到来

前，该阀门保持现有开启度不变。2220 回路的控制完成后，驱动程序继续对控制回路进行扫描，一直到所有控制回路的控制输出都扫描完成后，驱动程序退出。至此一个控制周期完成，等待下一个测量、控制运算、控制驱动周期的到来。

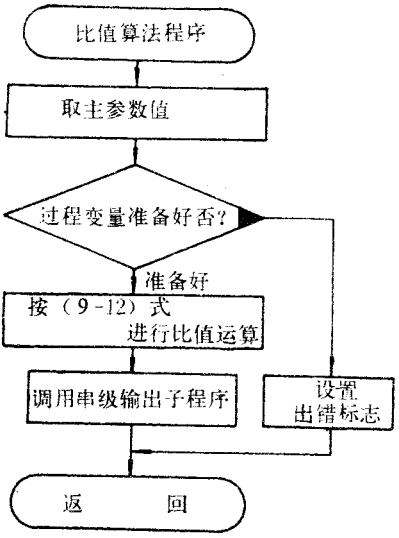


图 11－1－17　比值算法框图

四、DDC 系统的特点

1. 能消除常规模拟调节器的缺点：

(1)不存在模拟调节器的漂移、刻度误差等；

(2)参数调整范围宽；

(3)控制算式变动方便；

(4)对噪声有较好的滤波效果。

2. 使用灵活，便于实现特殊的控制规律。

3. 兼有多种功能 报警、测量值显示、参数的线性化处理等。

4. *DDC* 是更高一级控制方法的基础。

第三节　大滞后补偿控制

在选矿过程中，很多对象具有明显的纯滞后性质，例如磨机给矿、某些药剂及石灰乳

的输送管道、浓密机浓缩矿浆的输送等。对象的纯滞后时间，使调节系统的稳定性降低。特别是在衡量纯滞后对系统影响程度的特性参数 $\tau_0/T_0 \geqslant 0.5$ 时，若采用单纯的 PID 算法进行控制，是很难获得良好控制质量的。

大纯滞后调节系统，可以采用纯滞后补偿法来改善调节质量。大纯滞后调节系统的纯滞后补偿法是以 PID 调节为基础，加上滞后补偿控制算法构成的。

大纯滞后补偿控制的原理如下：若有一个如图 11－1－18 所示的大纯滞后系统，其闭环系统传递函数为

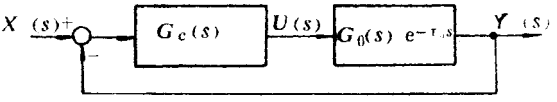


图 11－1－18　大纯滞后对象的常规反馈调节系统

$$G_s(s) = \frac{G_c(s)\,G_0(s)\,e^{-\tau_0 s}}{1 + G_c(s)\,G_0(s)\,e^{-\tau_0 s}}$$

在该系统传递函数分母中，包含着纯滞后环节 $e^{-\tau_0 s}$，使系统的稳定性降低，如果纯滞后时间 τ_0 足够大，系统将是不稳定的。为了改善这类大纯滞后对象的调节质量，需要引入一个与对象并联的补偿器(Smith 预估器)，其传递函数为 $G_\tau(s)$，如图 11－1－19 所示。加 $G_\tau(s)$的目的，是为了使调节器的输入信号超前，以补偿由对象的纯滞后造成的被调量测量信号的延误。为达此目的，经补偿后的等效对象的传递函数应为

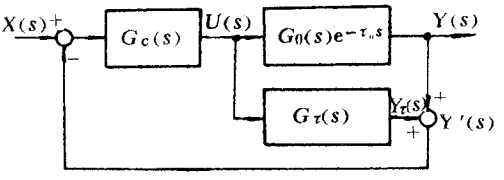


图 11－1－19　Smith 补偿方框图

$$\frac{Y'(s)}{U(s)} = G_0(s)\,e^{-\tau_0 s} + G_\tau(s) = G_0(s)$$

即

$$Y'(s) = G_0(s)\,U(s) \tag{1-20}$$

图 11－1－20 中：

$$Y(s) = G_0(s)\,e^{-\tau_0 s}\,U(s) \tag{1-21}$$

$$Y_\tau(s) = G_\tau(s)\,U(s) \tag{1-22}$$

$$Y'(s) = Y(s) + Y_\tau(s) \tag{1-23}$$

式中　$Y(s)$——未经补偿的反馈信号；

$Y'(s)$——经补偿后的反馈信号；

$Y_\tau(s)$——Smith 预估器的输出。

将公式(1－20)、(1－21)、(1－22)代入公式(1－23)得

$$G_\tau(s) = G_0(s)(1 - e^{-\tau_0 s})$$

这就是 Smith 预估器的表达式，相应的框图示于图 11－1－20。

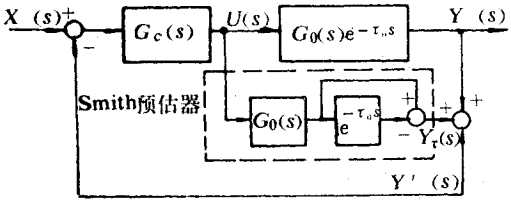


图 11－1－20　Smith 补偿回路

图 11－1－20 可等价变换成图 11－1－21，

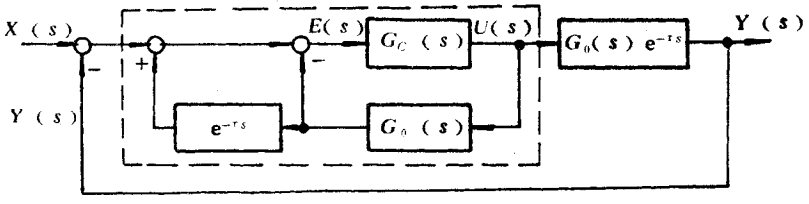


图 11－1－21　Smith 补偿回路的等效变换

从图 11－1－21 看，$Y(s)$和 $Y_\tau(s)$中的纯滞后部分能互相抵消。即

$$E(s) = X(s) - Y(s) - Y_\tau(s) = X(s) - U(s)\,G_0(s) \qquad (1-24)$$

公式(1－24)说明，经补偿后，调节器的输入信号中已消除了纯滞后的影响，因此能显著改善控制效果。

图 11－1－21 中闭环系统的传递函数为

$$G_{s\tau}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s)\,G_0(s)\,e^{-\tau_0 s}}{1 + G_c(s)\,G_0(s)} \qquad (1-25)$$

从公式(1－25)可看出，经补偿后闭环系统传递函数的分母中，已无 $e^{-\tau_0 s}$项。$e^{-\tau_0 s}$处在闭环系统之处，并不影响系统的稳定性，仅将控制过程在时间坐标上推移了一个时间 τ_0，而过渡过程的形状及其它所有质量指标，均与对象特性 $G_0(s)$(不存在纯滞后部分时)完全相同。所以对任何大纯滞后时间 τ_0，该系统都是稳定的。

例如，对于长距离石灰乳输送管道的 pH 调节系统，可采用如图 11－1－22 所示的调节系统，以消除纯滞后的影响。

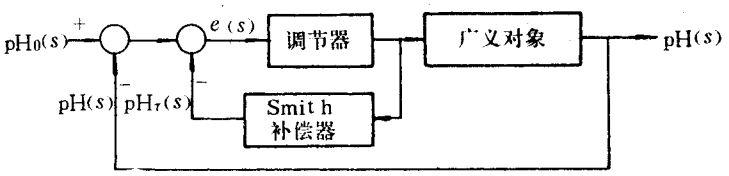


图 11－1－22　pH 大滞后补偿控制框图

控制效果比较：图 11－1－23 是一个以时间常数 $T=1\text{min}$，纯滞后时间 $\tau_0=1.05\text{min}$ 的一阶纯滞后对象调节系统的过渡过程曲线。图 11－1－23(a)曲线是采用 *PID* 算法，不带 Smith 预估器补偿时系统的过渡过程曲线(最佳参数整定)。图 11－1－23(b)曲线是采用 *PID* 算法，带 Smith 预估器补偿时的系统过渡过程曲线(最佳参数整定)。它们都是在给定值作阶跃变化 10 个单位时描述的。

从图 11－1－23(a)的曲线可看出，不采用 Smith 预估器时，需 7min 系统才趋于平稳，并且超调量在 －2.5～1.5 之间。从图 11－1－23(b)的曲线看出，采用 Smith 预估器后，系统过 4min 就趋于平稳，并且超调量只在 －1～0.5 之间，Smith 预估器对消除纯滞后的影响是明显的。

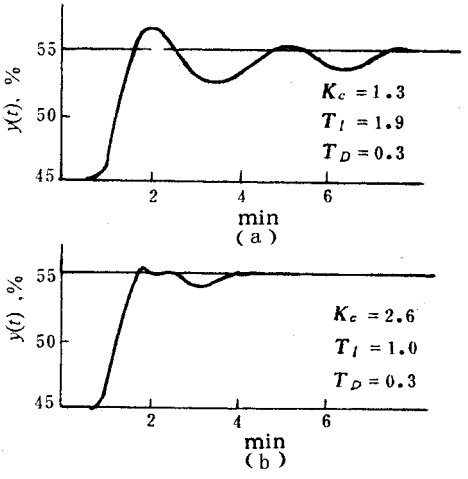


图 11－1－23　带 Smith 预估器补偿的效果比较

第四节　选矿多变量解耦控制

选矿过程是个复杂的过程，往往一个输入变量会同时影响几个输出变量。例如在闭路磨矿中，旋流器进料泵池补加水量的调节，既影响旋流器溢流的细度，也影响旋流器进

料的浓度;磨机处理量的改变,既影响旋流器溢流细度的变化,也同时影响其进料的浓度。这说明上述每个输入变量与两个输出变量之间存在着相互关联的关系,或称存在着耦合的关系。

当对上述闭路磨矿循环,采用以泵池补加水量为调节变量,以旋流器进料浓度为被调量,以及采用以磨机处理量为调节变量,以旋流器溢流细度为被调量,组成两个一般的反馈调节系统时,上述耦合关系是无法避免的。这种耦合关系如图 11－1－24 所示。调节系统之间的耦合,往往会引起两个系统都长久不能平稳,甚至无法正常运行。为使这两个调节系统均能很好地运行,就必须进行解耦。近年来国外对解耦控制相当重视。

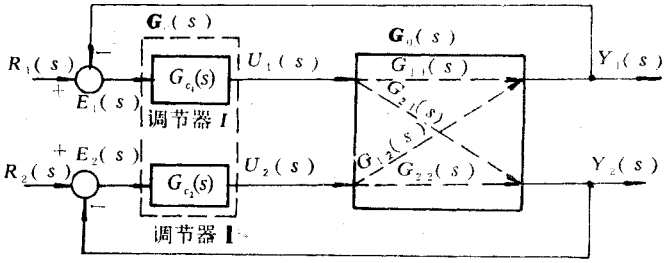


图 11－1－24　闭路磨矿循环耦合关系示意图

$R_1(s)$—旋流器溢流细度给定值;$R_2(s)$—旋流器进料浓度给定值;

$G_{c1}(s)$—调节器Ⅰ(旋流器溢流细度调节器)的调节规律;

$G_{c2}(s)$—调节器Ⅱ(旋流器进料浓度调节器)的调节规律;

$U_1(s)$、$U_2(s)$—调节器Ⅰ、Ⅱ的输出;

$G_{11}(s)$、$G_{22}(s)$—相应广义对象的传递函数;

$G_{21}(s)$、$G_{22}(s)$—相应耦合通道的传递函数;

$Y_1(s)$—旋流器的溢流细度;$Y_2(s)$—旋流器的进料浓度

所谓解耦控制,就是要设计一个控制系统,使得上述旋流器进料浓度调节器的输出,在改变泵池补加水量的同时,通过另一个控制算法 $F_{12}(s)$去改变给矿量。其作用是要消除由于补加水量的改变,而引起的旋流器溢流细度的改变。同样,旋流器溢流细度调节器的输出,在改变磨机处理量的同时,通过另一个控制算法 $F_{21}(s)$去改变泵池补加水量,以消除由于给矿量的变化而引起的旋流器进料浓度的影响(见图 11－1－25)。如果各控制通道的时间、幅度都配合得很好,就能消除两个系统之间的耦合,成为不再相互影响的两个独立的控制回路。对于两个以上变量的系统,解耦控制也同样能把多变量系统分解成若干个独立的单变量系统。

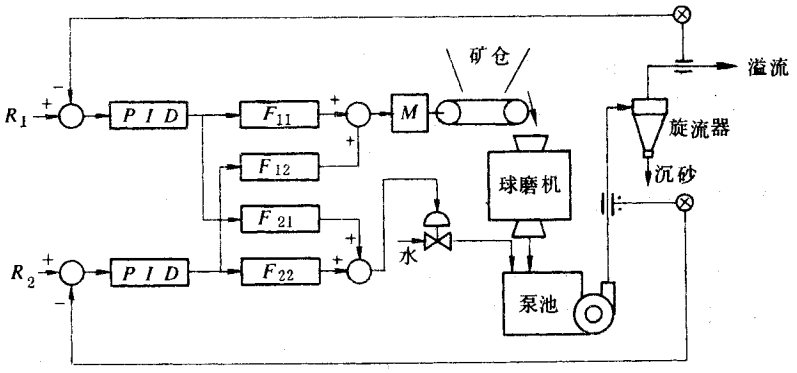


图 11－1－25　闭路磨矿循环多变量解耦控制示意图

下面从理论上阐明解耦的条件，解耦的综合方法。

一、解耦的条件

根据图 11－1－24，可画出如图 11－1－26 所示的多变量控制方框图。由图 11－1－26 可求得多变量控制系统的闭环传递矩阵如下

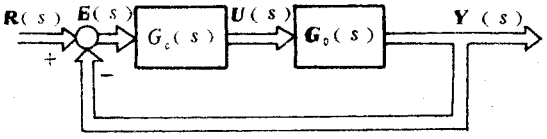


图 11－1－26　多变量控制系统

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

式中　$E(s) = \begin{bmatrix} E_1(s) \\ E_2(s) \end{bmatrix}$ ——偏差向量；

$R(s) = \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix}$ ——给定值(输入)向量；

$Y(s) = \begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix}$ ——输出向量。

从图 11－1－26 又可列出下列关系

$$G_0(s)\,G_c(s)\,[R(s) - Y(s)] = Y(s) \tag{1-26}$$

式中　$G_0(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$ 是对象的传递矩阵；

$$G_c(s)=\begin{bmatrix} G_{c_1}(s) & 0 \\ 0 & G_{c_2}(s) \end{bmatrix}$$ 是控制矩阵。

由公式(1－26)整理得

$$Y(s)=[I+G_0(s)G_c(s)]^{-1}G_0(s)G_c(s)R(s) \tag{1-27}$$

式中　I——单位矩阵。

令　$G_k(s)=G_0(s)G_c(s)$(开环传递矩阵)

则

$$Y(s)=[I+G_k(s)]^{-1}G_k(s)R(s) \tag{1-28}$$

由公式(1－28)可知,系统的闭环传递矩阵为

$$G_s(s)=[I+G_k(s)]^{-1}G_k(s) \tag{1-29}$$

在已知 $G_k(s)$后,可由公式(1－29)求出 $G_s(s)$。反过来,如已知 $G_s(s)$,可对公式(1－29)两端乘以$[I+G_k(s)]$,整理后为

$$G_s(s)=G_k(s)[I-G_s(s)]$$

上式两端乘以$[I-G_s(s)]^{-1}$,就得到由闭环传递矩阵表示的开环传递矩阵

$$G_k(s)=G_s(s)[I-G_s(s)]^{-1} \tag{1-30}$$

解耦的条件(即一个多输入－多输出控制系统,各控制回路相互独立的条件)是,系统的闭环传递矩阵必须是一个对角线矩阵。即

$$\boldsymbol{G}_s(s)=\begin{bmatrix} G_{s_{11}}(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_{s_{22}}(s) & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & G_{s_{nn}}(s) \end{bmatrix}$$

由公式(1－30)可知,为了要使 $G_s(s)$是一个对角线矩阵,则$[I-G_s(s)]$必为对角线矩阵,所以系统的开环传递矩阵 $G_k(s)$也必须是一个对角线矩阵。

在图 11－1－26 中的开环传递矩阵 $G_k(s)$是控制矩阵 $G_c(s)$和广义对象传递矩阵 $G_0(s)$二者的乘积,由于未解耦,显然不是对角线矩阵。为了达到解耦的目的,必须在多变量控制系统中引入解耦补偿装置 $F(s)$,如图 11－1－27 所示。

从图 11－1－27 可以看出,引入解耦补偿装置后,系统的开环传递矩阵变为

$$G_{kF}(s)=G_0(s)F(s)G_c(s)$$

$$F(s)=\begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix}$$

式中　$F(s)$——解耦补偿装置；

$G_{kF}(s)$——带解耦补偿装置的系统开环传递矩阵。

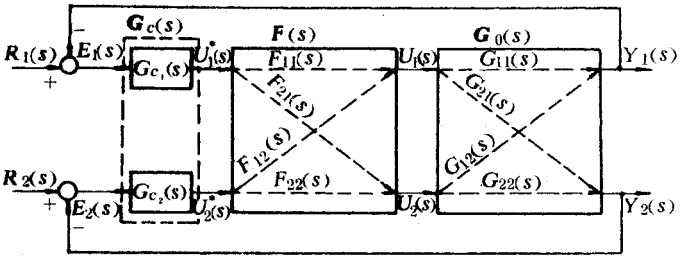


图 11－1－27　多变量解耦控制系统方框图

在设计时，由于各控制回路的调节器（调节规律）一般是相互独立的，控制矩阵 $G_c(s)$ 本身已为对角线矩阵，故只要 $F(s)$ 和 $G_0(s)$ 的乘积 $G_0(s)F(s)$ 为对角线矩阵即可使 $G_{kF}(s)$ 成为对角线矩阵。因此，综合（或设计）的任务就变为，根据对象传递矩阵 $G_0(s)$ 设计一个解耦补偿装置，使该解耦补偿矩阵 $F(s)$ 与对象传递矩阵 $G_0(s)$ 的乘积为对角线矩阵。由于使 $G_0(s)F(s)$ 成为对角线矩阵的方法不同，故产生了各种综合方法。

二、静态解耦的综合方法

解耦有动态解耦和静态解耦之分。简单地说，动态解耦的补偿是时间补偿，而静态解耦的补偿是幅值补偿。动态解耦要比静态解耦复杂些，一般只在要求比较高、解耦补偿装置又能实现的场合下才使用。对大多数相关控制系统来说，使用静态解耦已能达到目的，特别是当被控对象各通道的时间常数相差不十分悬殊时，使用静态解耦一般都能满足要求。由于静态解耦比较简单，易于实现，又能取得较好的解耦效果，故应用的场合较多，图 11－1－25 所列举的磨机旋流器闭路循环计算机解耦控制系统就是一个静态解耦的实例。

1．对角线矩阵综合法

为使图 11－1－27 的两个控制系统成为独立的不相关的两个系统，如上所述，必须使系统具有如下形式

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^*(s) \\ U_2^*(s) \end{bmatrix} \tag{1-31}$$

即应使

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix} \tag{1-32}$$

因为行列式

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \neq 0$$

因此，解耦补偿矩阵 $F(s)$ 可从公式(1－32)求得

$$F(s) = \begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$F(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{-G_{12}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \\ \dfrac{-G_{21}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{-G_{11}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & 0 \\ 0 & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dfrac{G_{11}(s)G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{-G_{22}(s)G_{12}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \\ \dfrac{-G_{11}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{G_{11}(s)G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{21}(s)G_{12}(s)} \end{bmatrix} \tag{1－33}$$

下面来验证，采用公式(1－33)的补偿装置能否消除耦合。先考虑调节变量 $U_1^*(s)$ 对被调量 $Y_2(s)$ 的影响，$U_1^*(s)$ 分别通过两个通道影响到 $Y_2(s)$。设 $Y_2(s)$ 为 $U_1^*(s)$ 经过 $F_{11}(s)$、$G_{21}(s)$ 后的被调量(见图 11－28)，$Y''_2(s)$ 为 $U_1^*(s)$ 经过 $F_{21}(s)$、$G_{22}(s)$ 后的被调量(见图 11－29)，并且具有

$$Y_2(s) = Y'_2(s) + Y''_2(s)$$

$U_1^*(s)$ 与 $Y'_2(s)$ 之间的关系，可用图(11－1－28)来表示。由图可知

$$\frac{Y'_2(s)}{U_1^*(s)} = \frac{F_{11}(s)G_{21}(s)}{1 + F_{22}(s)G_{22}(s)G_{c2}(s)}$$

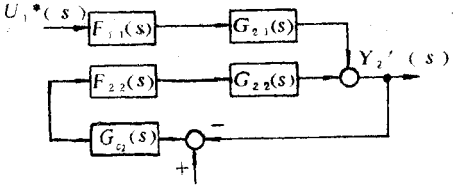


图 11－1－28　$U_1^*(s)$ 经过 $F_{11}(s)$ 和 $G_{11}(s)$ 后对 $Y_2(s)$ 的影响关系图

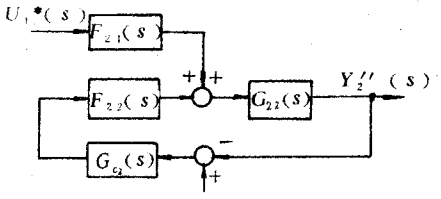


图 11－1－29　$U_1^*(s)$经过 $F_{21}(s)$和 $G_{22}(s)$后对 $Y_2(s)$的影响关系图

将公式(1－33)中 $F_{11}(s)$和 $F_{22}(s)$代入上式得

$$\frac{Y'_2(s)}{U_1^*(s)} = \frac{G_{11}(s)\,G_{22}(s)\,G_{21}(s)}{G_{11}(s)\,G_{22}(s) - G_{21}(s)\,G_{12}(s) + G_{11}(s)\,G_{22}(s)\,G_{c2}(s)\,G_{22}(s)} \tag{1-34}$$

$U_1^*(s)$与 $Y''_2(s)$之间的关系,可用图 11－1－29 来表示。由图知

$$\frac{Y''_2(s)}{U_1^*(s)} = \frac{F_{21}(s)\,G_{22}(s)}{1 + F_{22}(s)\,G_{22}(s)\,G_{c2}(s)}$$

将公式(1－33)中 $F_{21}(s)$和 $F_{22}(s)$代入上式得

$$\frac{Y''_2(s)}{U_1^*(s)} = \frac{-G_{11}(s)\,G_{22}(s)\,G_{21}(s)}{G_{11}(s)\,G_{22}(s) - G_{21}(s)\,G_{12}(s) + G_{11}(s)\,G_{22}(s)\,G_{22}(s)\,G_{c2}(s)} \tag{1-35}$$

由公式(1－34)和(1－35)分母相同,分子数值相同、符号相反,所以有

$$Y_2(s) = Y'_2(s) + Y''_2(s) = 0$$

由此可见,调节变量 $U_1^*(s)$的变化对 $Y_2(s)$没有影响。同样可以验证,调节变量 $U_2^*(s)$的变化对 $Y_1(s)$也没有影响。

根据上述分析,采用对角线矩阵综合法,解耦之后的两个控制回路就毫无关联,变成了截然分开的两个单独的回路,如图 11－1－30 所示。多变量解耦控制程序框图如图 11－1－31。

2. 单位矩阵综合法

应用单位矩阵综合法,与公式(1－31)相似,应有

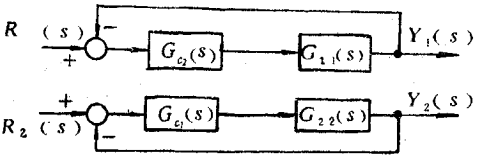


图 11－1－30　多变量解耦控制系统等效方框图

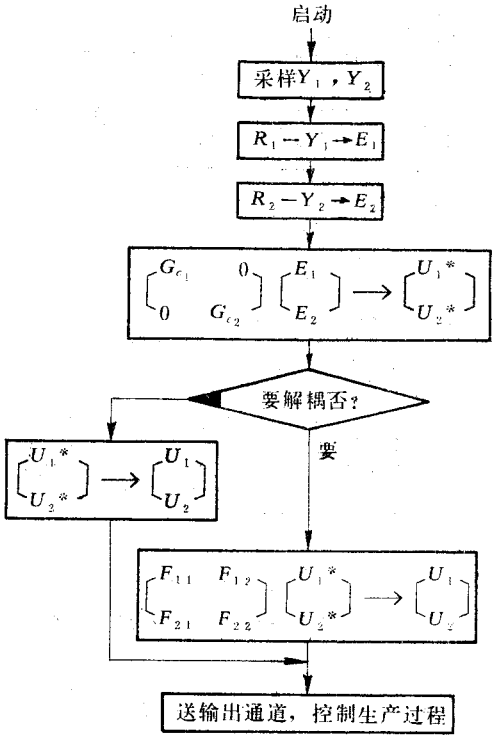


图 11－1－31　对角线矩阵综合法解耦控制程序框图

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_1^*(s) \\ U_2^*(s) \end{bmatrix} \tag{1-36}$$

公式(1－36)说明，被调量 $Y_1(s)$只受 $U_1^*(s)$的控制，而且做到 1:1 跟踪，不受另一个控制变量 $U_2^*(s)$的影响。$Y_2(s)$也同样只受 $U_2^*(s)$的控制。比较公式(1－31)和公式(1－36)，考虑公式(1－32)得出结论，应使

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1-37}$$

由于

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}\neq 0$$

所以

$$F(s)=\begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}^{-1}$$

$$=\begin{bmatrix} \dfrac{G_{22}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s)-G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{-G_{12}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s)-G_{21}(s)G_{12}(s)} \\ \dfrac{-G_{21}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s)-G_{21}(s)G_{12}(s)} & \dfrac{G_{11}(s)}{G_{11}(s)G_{22}(s)-G_{21}(s)G_{12}(s)} \end{bmatrix} \tag{1-38}$$

用前面讲过的方法，同样可验证用单位矩阵综合法，能去掉两个控制回路之间的相互关联。解耦后，原来两个相关的控制系统，就变成为两个毫不相关的单回路系统，如图 11－1－32 所示。

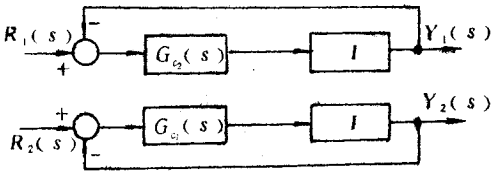


图 11－1－32　解耦控制系统等效方框图

3．前馈补偿综合法

前馈补偿是自动控制中，最早出现的一种克服干扰的方法。其结构简单，实现容易，效果显著，近年来已广泛地得到应用。应用前馈补偿实现解耦控制的系统方框图，如图 11－1－33 所示。

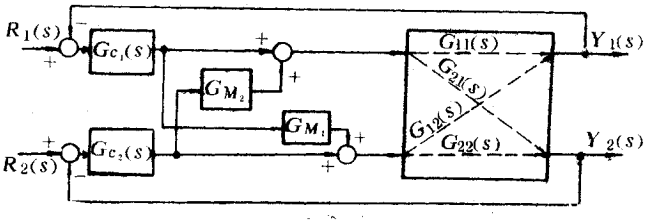


图 11－1－33　前馈解耦控制系统方框图

前馈解耦补偿装置按传递函数表示的特性，可根据前馈补偿原理求取：例如图 11－1－33 中有

$$G_{21}(s) + G_{M_1}(s)\,G_{22}(s) = 0$$

即

$$G_{M_1}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \tag{1-39}$$

$$G_{12}(s) + G_{M_2}(s)\,G_{11}(s) = 0$$

即

$$G_{M_2}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \tag{1-40}$$

式中　$G_{M_1}(s)$——前馈解耦补偿环节 1 的传递函数；

$G_{M_2}(s)$——前馈解耦补偿环节 2 的传递函数。

显而易见，应用前馈补偿综合法，按公式(1－39)和(1－40)构成的解耦控制系统，能够消除相互关联，使其成为各自独立的单回路。这种系统结构简单(也称为简化解耦)，

实现方便，比较容易理解和掌握。

从上述三种解耦综合方法的理论分析可以知道：通过不同的方法都能达到解耦的目的，但是应用单位矩阵综合法有更为突出的优点。应用对角线矩阵综合法与前馈补偿综合法所得到的解耦效果和系统控制质量是一样的，它们只是去掉交叉通道，使其成为两个独立的单回路。而应用单位矩阵综合法，除能达到十分良好的解耦效果外，还能提高控制质量，减少动态偏差，加快响应速度，缩短过渡时间。

图 11－1－25 系统的对角线综合解耦法控制效果见图 11－1－34 和图 11－1－35。从图 11－1－34 看出，当溢流细度给定值（以 －200 目％为单位）作阶跃（细度减小）变化时，反馈控制作用使磨机处理量相应地减少。而解耦控制作用，则同时使泵池补加水量也作相应地减小，以补偿由于矿量降低，而可能引起的矿浆浓度降低。因此旋流器进料浓度未受到显著影响。从图 11－1－35 看出，当旋流器进料浓度的给定值作阶跃降低时，反馈控制作用使泵池补加水量增加。而解耦作用则使磨机处理量也相应增加，以补偿由于补加水增加可能引起的溢流细度的变化。因此溢流细度也未受明显影响，达到了解耦的目的。

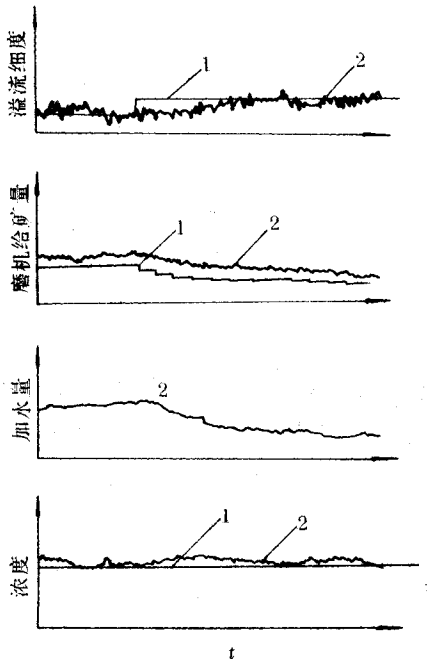


图 11－1－34　解耦控制效果Ⅰ

1—给定值或控制指令；2—测量值

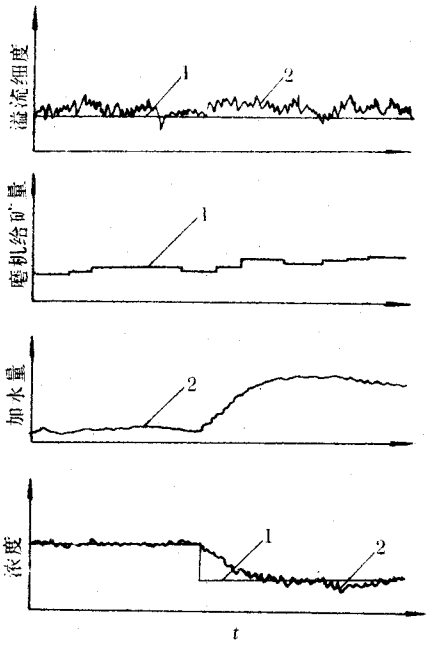


图 11－1－35　解耦控制效果 II

1—给定值或控制指令；2—测量值

以上三种解耦综合方法，虽是以双变量控制系统为例来讲述的，但对于三变量以上的相关控制系统的解耦，也是完全适用的。虽然前面只谈到在给定值扰动下的解耦效果，但在外干扰作用下，采用同样的解耦补偿装置，也一样可以获得比较满意的解耦效果。

大滞后 Smith 衬偿控制和多变量解耦控制的基本原理，还必须根据具体情况选择适当的计算方法并编成程序，方能在控制机上完成控制。

第五节　可编程序控制器

可编程序控制器（Programmable Logical Controller，简称 PLC 或 PC）是 80 年代迅速发展起来的，以微处理器为基础，综合了计算机技术与自动化技术而开发的新一代工业控制装置。

可编程序控制器最初是运用计算机的逻辑功能，用程序来代替老式接线式的继电器控制系统，进行顺序控制。随着微处理器的发展及完善，目前高级可编程序控制器不仅具有简单的逻辑控制功能，进行顺序控制，而且具有能完成复杂运算的直接数字控制（DDC）系统。亦即从开关量控制发展到过程控制。

目前 PC 广泛应用于各种生产过程控制领域，是现代工业控制中进行直接数字控制的最理想的控制设备之一。

可编程序控制器的定义：可编程序控制器是一种专为在工业环境下应用而设计的，数字运算操作的电子系统。它采用一种可编程序的存贮器，在其内部存贮执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令，通过数字式或模拟式的输入输出来控制各种类型的机械设备或生产过程。

一、可编程序控制器的特点

1. 控制方案修改方便　常规继电器控制系统要使用大量的硬件控制电路。在改变控制方案时，要对硬件控制电路进行大量的改装，工作量大而麻烦。而 PC 是用软件来修改，更改控制方案方便。这就是常说的 PC 具有灵活的可编程性。

2. 使用环境条件要求不高　与计算机相比，PC 整机设计制造都是从工业控制环境需要考虑的，增强了抗干扰的能力，不需要专门的恒温条件。

3. 通俗化的编程语言　PC 的编程语言简单，其操作人员可不必精通计算机软、硬件的知识，经过短期培训就能进行编程。

4. 很强的输入输出接口　能进行多种形式的数定量、模拟量的输入和输出。

二、可编程序控制器的基本组成

可编程序控制器从广义来说也是一种计算机控制系统，所不同的是它具有比计算机更强的与工业过程相联接的接口，具有更适用于控制要求的编程语言。它的基本组成如图 11－1－36 所示。PC 与微机的比较见表 11－1－1。

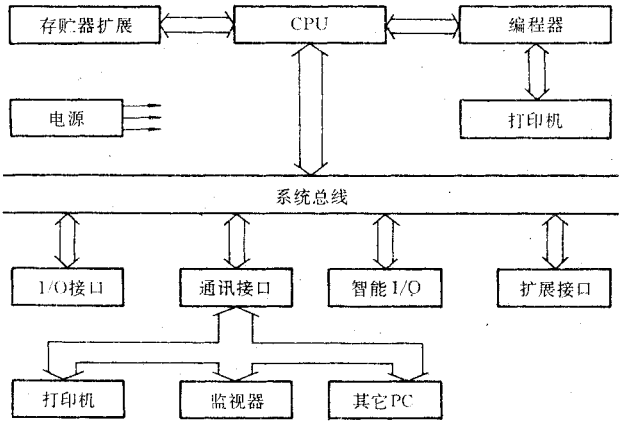


图 11－1－36　可编程序控制器系统框图

表 11－1－1　PC 与微机的比较

比较项目	PC	微机
工作目的	用于机械及过程自动化	计算、工控、数据管理
工作环境	工业现场	微机房、办公室、实验室
工作方式	顺序扫描方式	中断处理方式
表现形态	编程器和执行主机共两套计算机	设有专门的编程器
输入设备	控制开关、传感器、接点状态 编程器、通信接口、其它计算机等	键盘、磁带机、磁盘机、 鼠标器、通信接口等
输出设备	电磁开关、电动机、电磁阀、 电磁继电器、报警显示器、灯等	CRT、打字机、磁带机、 磁盘机、扬声器等
特殊措施	抗干扰措施 ;各种动态检测 ;停电 保护 ;监控功能 ;易维护的结构等	掉电保护等一般措施
所用软件	一般多用梯形图符号 语言,操作系统等	汇编、FORTRAN、PASCAL、C 等通用语言
对操个人员的要求	一般不用学习专门语言, 不需有软、硬件方面的知识	软件工作者、计算机工作者、有 一定计算机基础的工程技术人员

1. 中央处理器(CPU)

中央处理器是 PC 整个系统的核心。它相当于一个微型计算机系统,在中央处理器中,备有操作系统和用户编程用的内存单元。中央处理器通过 I/O 接口与被调对象进行联接,它将各输入端口的状态信息读入,并按照用户程序的需要去处理。在 PC 中,中央处理器称作 CPU 模板。

2. 存贮器扩展

存贮器扩展模板是用以扩展内存的,根据用户需要可选择扩展不同容量的 RAM,EPROM,EEPROM 等。

3. I/O 接口

I/O 接口是输入、输出接口模板,它负责把工业过程的信号与 CPU 模板联系起来,也负责把 CPU 对工业过程的控制等信息传递给生产过程控制中的相应仪表、设备。I/O 接口模板中包括数字量输入、输出接口及模拟量输入、输出接口。

4. 通讯接口

通讯接口模板是负责人－机－生产过程及机与机之间进行对话的装置,PC 配有各种功能的通讯接口。通过不同的接口可以与监视器,打印机和其它 PC 或计算机相联。

当通过接口与其它 PC 相连时,可以组成多机系统或网络,以实现对整个工厂的控制。当与计算机相联时,可组成多级控制系统。

5. 智能 I/O

智能 I/O 是智能输入、输出模板。智能输入、输出模板是指能够与 PC 的总线相联接的,其本身具有微处理器和系统软件的,并可与 PC 并行工作的模板。

为了满足复杂控制功能的需要,PC 配有各种不同功能的智能 I/O 接口模板。使用智能 I/O 接口模板,使 PC 不仅具有顺序控制,还可实现闭环控制等复杂控制功能。

6. 扩展接口

当用一个中心单元不能满足所要求的控制任务时,就要对系统进行扩展,扩展接口就是用于把中心单元与扩展单元相联接,扩展单元与扩展单元相联接的接口模板。

7. 编程器

编程器是用于编写、输入、调试用户程序的。同时,编程器也可作为现场的监视设备使用,把编程器与打印机相联,还可以输出、打印用户程序和有关信息。

8. PC 的电源

PC 所用的工作电源一般要求有三路输出;一路供 CPU 模板工作用;一路供编程接口使用;一路供各种智能模块使用。对电源要求较高时,最好使用 UPS 电源。

三、闭环控制模板

闭环控制模板是一个智能 I/O 接口模板,它在不同的软件功能模块作用下,可实现 *P*、*PI*、*PID* 控制。由于闭环控制模块既要与 PC 的系统总线相联,又要与生产过程相联,所以该模板配备有较多的接口。相应于各种不同的用途,闭环控制模板具有各种不同的控制结构。

1. 闭环控制模板硬件结构

不同厂家生产的闭环控制模板结构都不尽相同,现以德国西门子公司的通用闭环控制模板为例说明(见图 11 - 1 - 37)。

通用闭环控制模板结构包括两部分:一部分是模拟量部分,另一部分是处理器部分。这两部分之间用电缆联接。模拟量部分包括模数转换和数模转换。处理器部分采用 80186 微处理器,用以实现各种算法的计算,实现各种控制功能。通过图中的总线接口与 PC 总线相联,并通过总线与 PC 的 CPU 模块交换信息。图中的编程接口用以与编程器相联,实现对该模板的编程和监控。图中的存贮子模块接口与 EPROM 及 EEPROM 相联接,用以调用与所选定的控制结构相应的闭环控制模块系统程序。

西门子公司的通用闭环控制模块具有三种控制结构:标准控制结构、电机拖动控制结构和带有自校正的电机拖动控制结构。本书介绍用途广泛的标准控制结构。

2. 通用闭环控制模块的标准控制结构

标准控制结构用于单回路闭环控制系统，它具有 *P*、*PI*、*PD* 和 *PID* 控制功能。图 11－1－38 是标准控制结构的示意图。该标准控制结构包括许多子功能(分支)。这些分支可以通过构成开关进行选择，以构成用户所需要的控制结构。各个分支的作用如下：

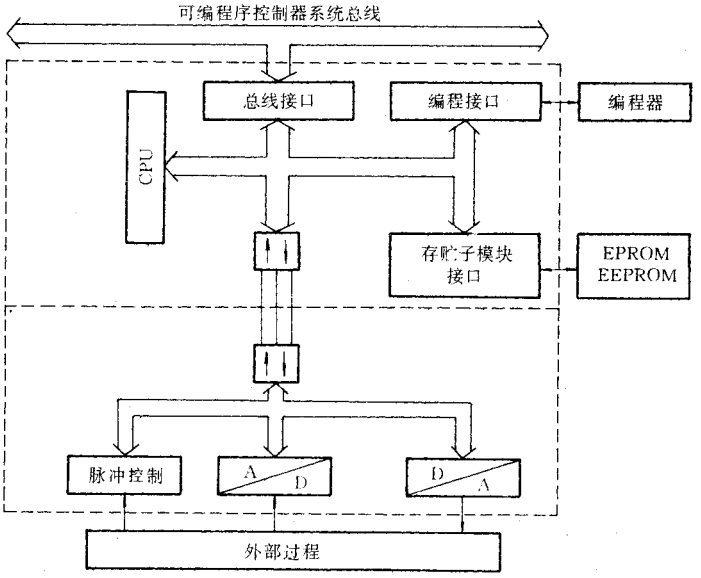


图 11－1－37　通用闭环控制模板硬件结构

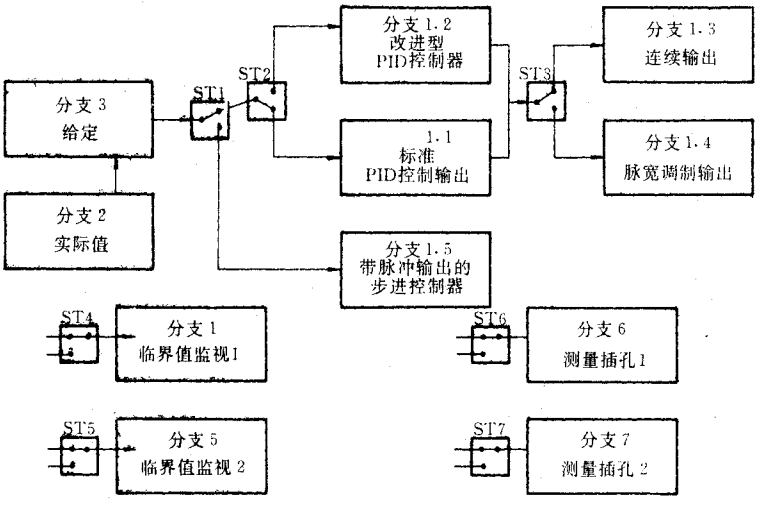


图 11－1－38　标准控制结构示意图

分支 1.1 联接 *PID* 控制器，用可选择控制参数。输入参数来自分支 3。输出参数在分支 1.3 和分支 1.4 中转换成控制变量。

分支 1.2 :改进型的 *PID* 控制器。它在分支 1.1 的基础上,具有附加的比例增益、前馈控制等辅助功能。

分支 1.3 :连续输出。通过分支 1.3,控制器的输出可以作为一个连续信号送到执行机构。

分支 1.4 :脉宽调制输出,可用来实现双位置控制和三位置控制。

分支 1.5 :具有脉冲输出的步进控制器,相当于具有脉宽调制输出的控制器,具有三组步进控制功能。

分支 2 :实际值检测功能分支。实际值可以是模拟量,也可以是数字量,对所检测的变量可进行平均值处理,以减少测量误差。

分支 3 :给定分支。给定值信号既可以是模拟量,也可以是数字量。

分支 4 和分支 5 :临界值监视。它们可监视控制回路中 6 个测量点,通过设定相应的临界位来表示测量点的值是否超过临界值。

分支 6 和分支 7 :测量插孔。

四、编程语言

可编程序控制器的语言既不同于高级语言,也不同于汇编语言,高级语言显得太深奥,而在汇编语言中,常量和变量又太烦琐。PC 的主要用户是工程技术人员,应用场合是工业生产过程。所以要求 PC 的编程语言要易于编写和调试。

1.PC 语言的特点

(1)图形式指令结构　PC 的编程语言用图形方式表达运算功能,指令由不同的符号图形组成,易于理解记忆。在 PC 系统中,已把工业控制中所需的独立运算功能编制成象征性图形。应用程序编写者的任务是把这些图形按照过程控制的需要,进行组合,并填入适当的参数即可。

(2)变量和常量有明确规定　PC 的编程语言对变量和常量及其取值范围有明确的规定,使用方便、简单。

(3)具有可供选择的软件包　为适应一般的逻辑运算、复杂的算术运算及专用功能,PC 编程语言通常具有三级软件包:

①基本指令组 :该指令组包括逻辑运算功能,计时、计数功能和无符号算术运算;

②高级指令组 :高级指令组包括所有基本指令组的指令,增加了带符号的算术运算、双精度算术运算等复杂的算术运算指令;

③扩展指令组 :该指令组是高级指令组的基础上增加了浮点运算、PID 运算及各种

专用功能块的特殊功能指令。

对于不同的控制目的，可配备上述不同等级的指令软件包，供运行时调用。

各公司生产的 PC 编程语言指令不尽相同，但它们一般都具有上述特点。

PC 具有多种形式的面向工程技术人员的语言：有供顺序控制用的梯形图语言；有适用于数值控制的系统流程图语言；有类似于汇编语言的语句表语言等。在大型 PC 中还具有 BASIC、C 语言等高级语言。目前大都以梯形图语言加高级语言组成大、中型 PC 的编程语言。

2. 梯形图语言

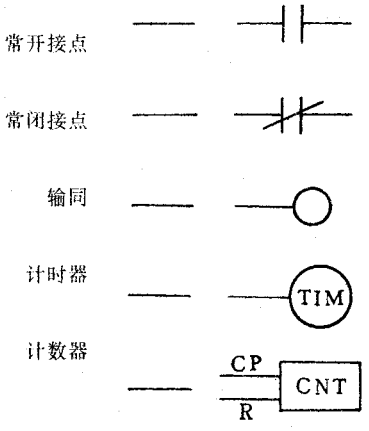
梯形图语言编程过程是：

(1)画出完善的控制系统图；

(2)把控制系统图中的控制思想绘成梯形图；

(3)根据梯形图编制编码表，编码表分地址、指令和数据三部分；

(4)用编程器把编码表中的代码及指令输入 PC 中。

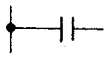
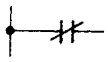
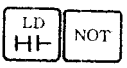
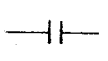
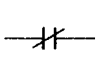
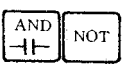
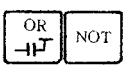
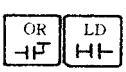
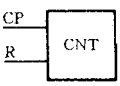


各公司生产的 PC 所使用的梯形图语言不完全相同，以下以日本石立公司生产的 C 系列 PC 所使用的梯形图语言为例，讲解基本指令。梯形图的基本指令符号为常开接点、常闭接点和输出，计时器和计数器也属基本指令：

编码表中的数据为有关器件的编号，继电器及内部辅助继电器用 4 位数编号，其前两位为通道号，后两位为点号(在 C 系列中，每个通道由 16 个点组成，其编号为 00 ~ 15)。计时器与计数器用两位数编号，在 C 系列中计时器加计数器的总个数不得超过 48 个，所以其编号统一由 00 ~ 47 组成。

C 系列基本指令列于表 11 - 1 - 2 中，基本指令梯形图列于表 11 - 1 - 3 中。

表 11－1－2　C 系列机基本指令

指令	符号	助记符	操作数字	功能	数据
LOAD(LD)			继电器号	以常开接点开始的操作符号	继电器编号 输入、输出继电器 0000—0915 辅助继电器 1000—1907 保持继电器 HR000—HR915 计时器 TIM00—47 设定时间 0—999.9s 计数器 CNT00—47 设定值 0—9999 暂存继电器 TR0—TR7 （TR 只用在 LD 指令）
LOAD NOT			继电器号	以常闭接点开始的操作符号	
AND			继电器号	逻辑‘与’操作，即串联常开接点	
AND—NOT			继电器号	将常闭接点串联	
OR			继电器号	并联常开接点	
OR－NOT			继电器号	并联常闭接点	
AND—LOAD				串联联接两组接点	
OR—LOAD				并联联接两组接点	
OUTPUT			继电器号	把相应电路的操作结果输出给指定的输出继电器、辅助继电器。锁存继电器或移位寄存器中	继电器编号 输出继电器 0500—0915 辅助继电器 1000——1807 保持继电器 HR000—HR915 暂存继电器 TR0—TR7
TIMER			计时器号和设定计时值	接通延时 0—999.9 秒	计数器和计时器编号均为 00—47 设定值为 0000—9999
COUNTER			计数器号和设定计数值	减计数操作，设定值 0—9999	

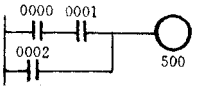
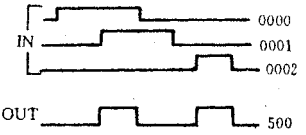
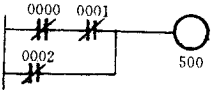
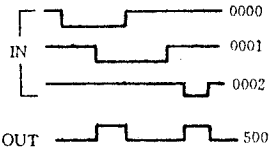
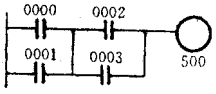
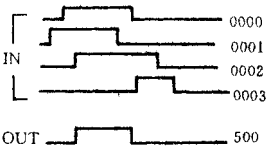
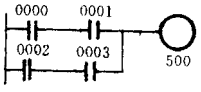
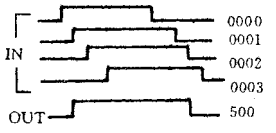
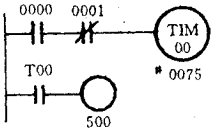
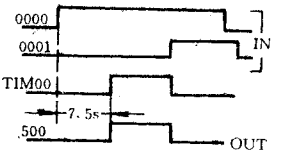
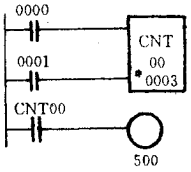
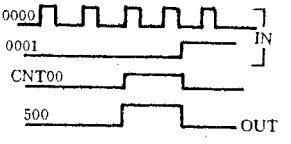
梯形图语言应用举例

例　PC 机在传送带电机控制中的应用。

控制目的：PC 机用来启动停止分段传送带的驱动电机，只使那些载有物体的传送带运转，没有载物的传送带停止运行，以节省能源。控制系统图如图 11－1－39，梯形图如

图 11－1－40，编码表见表 11－1－3，输入输出分配见表 11－1－4。

表 11－1－3　C 系列机基本指令梯形图

基本指令	代码表	说明	动作示意图
	LD0000 AND0001 OR0002 OUT500	输入 0000 和 0001ON 时或输入 0002ON 时，继电器 500 都 ON	
	LD NOT '0000 AND NOT '0001 OR NOT '0002 OUT500	输入 0000 和 0001 都 OFF 时或输入 0002OFF 时，继电器 500 都 ON	
	LD－0000 OR－0001 LD－0002 OR－0003 AND－LD OUT－500	输入 0000 和 0002ON 或 0000 和 0003ON 或 0001 和 0002ON 或 0001 和 0003ON 时，继电器 500 都 ON	
	LD0000 AND0001 LD0002 AND0003 ORLD OUT－500	输入 0000 和 0001ON 或 0002 和 0003ON 时，继电器 500 都 ON	
	LD0000 AND NOT '0001 TIM00 #0075 LD TIM00 OUT－500	输入 0000 和 0001 都闭合时（即 0000ON 和 0001OFF），7.5 秒后 TIM 闭合，继电器 500 都 ON	
	LD0000 LD0001 CNT00 #0003 LD－CNT00 OUT－500	输入 0000 通断 3 次时使 CNT 接通，继电器 500ON，当 0001 接通时，CNT 复位	

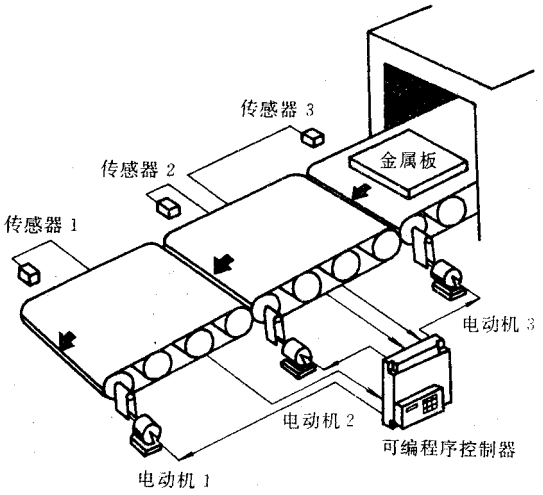


图 11－1－39　传送带电机控制系统图

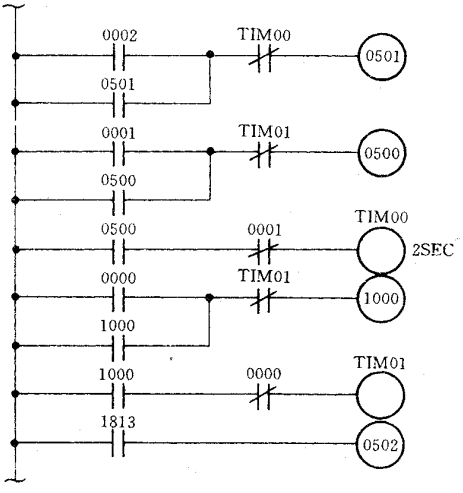


图 11－1－40　传送带电机控制系统梯形图

表 11－1－4　传送带电机控制系统编码表

地址	指令	数据
0200	LD	0002
0201	OR	0501
0202	AND－NOT	TIM00
0203	OUT	0501
0204	LD	0001
0205	OR	0500

地址	指令	数据
0206	AND – NOT	TIM01
0207	OUT	0500
0208	LD	0500
0209	AND – NOT	0001
0210	TIM	00
		# 0020
0211	LD	0000
0212	OR	1000
0213	AND – NOT	TIM01
0214	OUT	1000
0215	LD	1000
0216	AND – NOT	0000
0217	TIM	01
		# 0020
0218	LD	1813
0219	OUT	0502

控制执行过程：金属板按传感器 3、2、1 的顺序被检测，梯形图中第一个输入信号来自传感器 3（见图 11 – 1 – 39），输入 0002 号接点（见图 11 – 1 – 40），当导通肘，PC 机输出 0501，相应地使 2 启动。当传感器 2 输入的接点 0001 号导通时，输出 0500 启动电机 1。当金属板离开电机 2 带动的皮带，进入电机 1 带动的皮带时，传感器 2 输出的 0001 接点复原，启动计时器 TIM00，时间经 2s 后 0501 失电，2 号电机停止转动。由于这时传感器 1 输出的 0000 接点闭合，使继电器 1000 动作，指挥下一级的机构工作。当金属板离开由电机 1 带动的皮带后，传感器 1 输出的 0000 复原，启动 TIM01 计时器，2s 后继电器 0500 和 1000 都失电，电机 1 也停止。

表 11 – 1 – 5　传送带电机控制系统 I/O 分配表

输入设备号	继电器号
传感器 1	0000
传感器 2	0001
传感器 3	0003
输出设备号	**输出编号**
电机 1	0500
电机 2	0501
电机 3	0502

第二章　监督控制系统

第一节　监督控制系统的结构

完整的最优控制系统基本由两部分组成。一是寻找最优工况(SCC 系统的任务)；二是根据计算机所找到的最优工艺条件去实现生产过程的最优化控制。后一任务既可以用计算机进行直接数字控制来实现,也可以用常规仪表进行控制。在条件不具备时,还可以在计算机与常规仪表之间加进人工调整作用。下面用图例来说明这三种情况。

一、开环最优控制(操作指导控制)

如图 11－2－1 所示的开环最优控制系统中,生产过程是由常规仪表进行自动调节的。最优工艺条件则由计算机来寻找。在生产过程中将各参数的实测值输入到计算机。计算机根据预先编好的数字模型及最优化方案程序,计算出当时的最优工况,并用数字显示和打印记录下来。操作人员根据显示的结果,去调整有关调节回路的给定值。由常规调节器计算调节作用,并向执行机构发出调节信号,使得被调量符合新给定值的要求以保证生产过程获得较好的指标。在这个系统中,计算机的命令是通过人去执行的、生产过程与计算机之间的回路没有闭合起来,所以这种控制方式称为‘开环’最优控制(或称操作指导控制)。

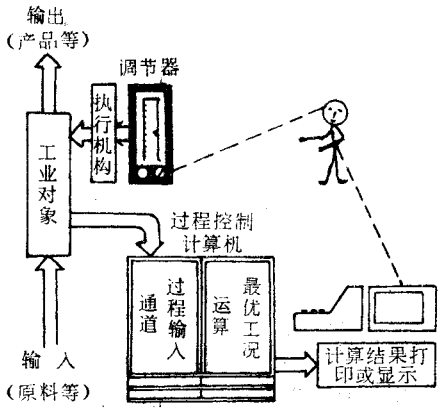


图 11－2－1　开环最优控制示意图

二、由计算机与常规仪表组成的闭环最优控制

图 11－2－2 是由计算机与常规仪表组成的闭环最优控制系统的示意图。由计算机算出最优工况，再由计算机把该最优工况信号输给常规仪表调节系统的自动调节给定机构，去调整各有关调节通道常规调节仪表的给定值。调节器根据新的给定值，发出相应的指令给执行机构，以使调节变量符合最优工艺条件所要求的数值。

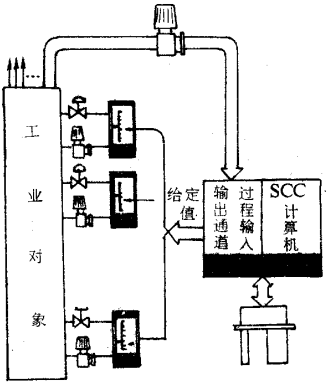


图 11－2－2　计算机、常规仪表闭环控制系统示意图

完全由计算机控制的闭环最优控制图 11－2－3 所示的是用计算机进行直接数字控制完成自动调节的示意图。当 SCC 系统计算出最优工况后，把该信号输送到直接数字控制计算机中去，改变有关 DDC 控制回路的给定值。在 DDC 控制机中，经过比较及计算后，直接输出一调节信号给执行机构，指令执行机构根据新的工艺条件调整调节变量，使调节变量符合最优工艺条件所要求的数值。

这种计算机闭环最优控制可用一台计算机完成最优工况的寻找和进行 DDC 控制双

重任务,也可分由两台计算机来分别完成这两个任务。目前的发展趋势是用两台数字计算机分别完成这两个任务。

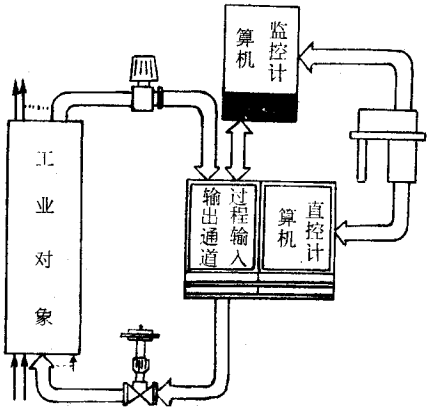


图 11－2－3　计算机控制闭环最优控制系统示意图

第二节　选矿过程 SCC 系统举例

一、国外某矿 Cu－Zn 选矿厂对 Cu 优先浮选作业采用搜索法进行最优化控制

该矿的 Cu－Zn 矿物是不均匀嵌布矿石,矿石经第一次闭路磨矿后,其旋流器溢流细度达－325 目占 55%时,就进行中间浮选,以回收粗粒嵌布黄铜矿,将所得尾矿进行第二次闭路磨矿,其旋流器溢流细度达－325 目占 80%时,进行 Cu 优先浮选的粗选及一次扫选。扫选精矿再磨后返回粗选给矿。中间浮选的 Cu 精矿要经二次精选。粗选 Cu 精矿则要经三次精选,即得合格精矿。精选尾矿与扫选精矿合并再磨。该流程的药剂制度如下:

Cu 浮选是在 pH 约为 6.5 的情况下进行的。在中间浮选前的搅拌槽中用 SO_2 进行调节,中间浮选加黑药作捕收剂,加甲基异丁基甲醇作起泡剂。在 Cu 粗选作业中补加黑药,在扫选作业中补加异丁基纳黄药(以下简称黄药)和黑药,在 Cu 精选作业中加 NaCN 以抑制黄铁矿。该厂对其它药剂进行比值控制,对黄药和黑药的最佳用量是通过试行法搜索找出的。

该厂浮选作业最优控制方案以图 11－2－4 的模型作判据,按照图 11－2－5 的程序

来探索，以确定此刻是应该增加捕收剂，还是减少捕收剂。当确定此时应该调节的药剂用量方向（增、减）后，启动图 11－2－6 所示的药剂调节回路搜索程序，以确定此次应在哪个作业调节药剂，至此 SCC 级工作告一段落，由计算机将由 SCC 系统所确定的调节信息传送给 DDC 系统的相应回路，由 DDC 系统去完成对指定作业药剂用量的调节。

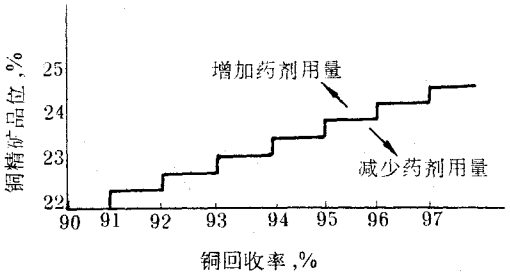


图 11－2－4　品位/回收率模型

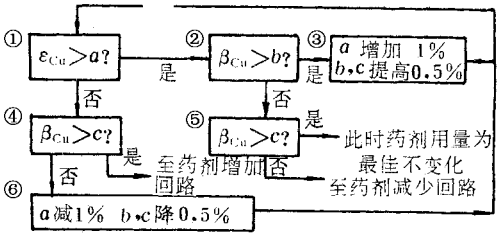


图 11－2－5　药剂用量调节方向搜索程序框图

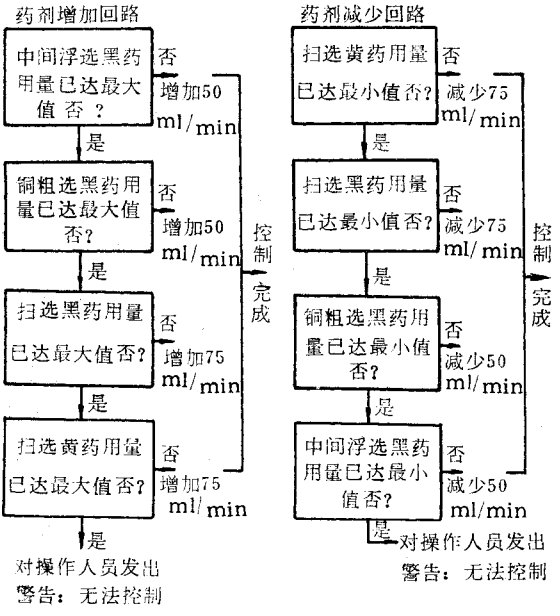


图 11－2－6　药剂调节回路搜索程序框图

具体搜索步骤如下：

1. 确定最佳回收率指标　假设现时测得 β_{Cu} 为 24%，计算机根据图 11－2－4 的模型得知，此时相对应的最佳经济收益的回收率应是 94%。此时的精矿品位上限应为 24%，其下限应为 23.5%。计算机自动地在图 11－2－56 的方框①中置 $a=94\%$，在框②中置 $b=24\%$，在框④、框⑤中置 $c=23.5\%$，而在①、②、④、⑤框内的 ε_{Cu} 及 β_{Cu} 符号则表示此刻实际测量计算的铜回收率及精矿铜品位。

2. 药剂用量调节方向的搜索　把上述实际的品位及回收率置入相应的框内，首先判断回收率是否大于 94%；若判断结果是目前回收率不大于 94%，接着就判断 Cu 精矿品位是否大于 23.5%，若判断结果是大于 23.5%，说明此时增加捕收剂用量有可能增加回收率，而不太影响 Cu 精矿品位，计算机就去指挥增加捕收剂（按图 11－2－6 程序去增加）。当增加了捕收剂后，再把当时新的 ε_{Cu} 与 a 比较，新的 β_{Cu} 与 b 及 c 比较（即经过①、②、⑤框的比较），假如增加了捕收剂后使得铜精矿回收率 $\varepsilon_{Cu}>94\%$，但由于增加了捕收剂使连生体及脉石也夹带上来一部分，因而使铜精矿品位 β_{Cu} 低于 23.5%，则此时需要减少捕收剂用量，计算机就指挥减药回路动作（见图 11－2－6）。药剂相应减少后，再以减药后的 ε_{Cu} 及 β_{Cu} 指标按图 11－2－5 的程序进行比较，判断。假定此时 $\varepsilon_{Cu}>94\%$，$24\%>\beta_{Cu}>23.5\%$，则此次调整结束，此时的药剂用量是最适合的。

如果在某一次比较的结果是 $\varepsilon_{Cu}>94\%$，$\beta_{Cu}>24\%$，则计算机根据图 11－2－5 程序的判断，自动地将①框内的回收率给定值 a 增加 1%，将②、④、⑤框内的品位给定值 b 及 c 自动增加 0.5%，再继续进行比较判断。

如果在某一次判断结果是 $\varepsilon_{Cu}\not>94\%$，$\beta_{Cu}\not>23.5\%$，则根据图 11－2－5 程序中⑥框的判断，自动地将①框内的回收率给定值 α 减少 1%，将②、④、⑤框内的品位给定值 b 及 c 减少 0.5%，然后再继续比较、判断。

在每一轮搜索后，只有在回收率 $\varepsilon_{Cu}>$ 给定值，而品位则正好介于按图 11－2－4 模型确定的给定值的上限与下限之间时，这时的药剂条件才是最适合的。否则会打破品位—回收率之间的平衡关系，对经济收益是不利的。

3. 药剂调节回路的搜索　当确定药剂调节方向（增还是减）后，还要经过回路搜索程序来确定应该对哪一个作业的药剂用量进行调节。假如已确定需增加捕收剂，则计算机启动药剂增加回路搜索程序（见图 11－2－6）。药剂增加回路按照中间浮选、粗选、扫选的顺序进行探索。首先探索中间浮选的黑药用量是否达最大值 3000ml/min，如用量已达最大值，就不能再加大该作业捕收剂用量。此时要去探索粗选作业黑药的用量，如其用量未达最大值 3000ml/min，则增加粗选黑药用量 50ml/min。计算机把这个决定传送给 DDC 系统，将粗选黑药用量调节回路的给定值增加 50ml/min。若粗选黑药用量也已达

到最大值 3000ml/min，则再去探索扫选黑药用量。若扫选黑药用量也已达最大值 3000ml/min，则再去探索扫选黄药用量。若扫选黄药用量也已达最大值 600ml/min，则计算机发出报警信号。告诉操作人员，按现在给定的药剂范围，计算机无法进行控制，请操作人员采取相应措施。减药回路探索过程与上述类似（其药剂用量最小值为扫选黄药 150ml/min，扫选黑药 300ml/min，铜粗选黑药 600ml/min，中间浮选黑药 1200ml/min）。

二、皮哈萨尔米选厂最优化控制

该厂处理矿石中的主要矿物为：黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿。采用优先浮选流程，加 CaO、NaCN、$ZnSO_4$ 作抑制剂，在 pH = 12 的条件下浮 Cu；然后加 $CuSO_4$ 活化闪锌矿，加 $Ca(OH)_2$、NaCN 作抑制剂，在 pH > 12 的条件下浮 Zn；最后加 H_2SO_4 活化黄铁矿，在 pH = 5 的条件下，加适量的絮凝剂浮黄铁矿。

该厂使用了两台库里厄 300 型载流 X 光分析仪（其中一台有 12 个流道，另一台有 14 个流道），同时测定 Cu、Zn、Fe 元素。使用 H—DDP516 计算机对铜浮选作业进行两级控制，第一级是 DDC 系统，第二级是 SCC 系统。

Cu 浮选采用一次扫选，三次精选流程，其产品为最终 Cu 精矿。Cu 浮选尾矿作锌浮选系统的给矿。

Cu 浮选的主要问题有两个：一是闪锌矿被 Cu 离子沽化后，降低 Cu 浮选精矿的 Cu 品位，并影响 Zn 的回收率。二是原矿品位变动频繁。通过试验确定，要得到合格品位的 Cu 精矿和获得最大利润，其关键是控制粗选精矿的刮出量和 NaCN 用量。因为 NaCN 用量对浮选效果非常灵敏，并且 NaCN 用量与 Cu 精矿含 Cu、Zn 及尾矿含 Cu 品位的关系不是固定的，所以给控制带来困难。另一方面，通过试验发现给矿 Cu 品位、Zn 品位和矿浆给矿量对指标也有很大影响。

根据以上特点，将给矿 Cu 品位 x_4、给矿 Zn 品位 x_5 和入选矿量 x_6 确定为干扰变量。加入磨机的 NaCN 用量 x_1 和加入精选的 NaCN 用量 x_2，精选精矿刮出量 x_3 作为控制变量。Cu 浮选系统的被调变量是 Cu 精矿 Cu 品位 y_1、Cu 精矿含 Zn 品位 y_2、尾矿 Cu 品位 y_3。控制目标函数是经济效率指标（即利润指标）。过程数学模型采用统计模型，运用静态模型，动态补偿技术，使模型中既包含了静特性，也包含了动特性。制定上述模型的步骤是：

1. 用数理统计法建立各被调变量与干扰变量和控制变量之间的静态模型

$$\hat{y}_j = a_{j0} + a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 + a_{j4}x_4 + a_{j5}x_5 + a_{j6}x_6 \qquad (2-1)$$

式中　$\hat{y}_1$——Cu 精矿 Cu 品位估计值；

$\hat{y}_2$——Cu 精矿中 Zn 含量估计值；

$\hat{y}_3$——Cu 浮选尾矿含 Cu 品位估计值；

a——系数；

j——被调量序号($j=1,2,3$)。

2. 求出过程各通道的传递函数

$$\frac{Y_{jP}(s)}{X_{jP}(s)}=\frac{Ke^{-\tau_{jP}s}}{(1+T_{1jP}s)(1+T_{2jP}s)}$$

式中　$X_{jP}(s)$——各通道输入的拉氏变换式；

$Y_{jP}(s)$——各通道输出的拉氏变换式；

K——静态放大系数；

τ——纯滞后时间；

T_{1jP}，T_{2jP}——时间常数；

P——干扰变量和控制变量序号 $P=1\sim6$。

令

$$Y^*_{jP}(s)=\frac{Y_{jP}(s)}{K}$$

则

$$\frac{Y^*_{jp}(s)}{X_{jp}(s)}=\frac{e^{-\tau_{jP}s}}{(1+T_{1jP}s)(1+T_{2jP}s)} \tag{2-2}$$

3. 通过 Z 变换及 Z 反变换，把各通道的传递函数变成差分方程

$$\begin{aligned}y^*_{jp}(nT)&=d_{jp}y^*_{jp}[(n-1)T]+b_{jp}y^*_{jp}[(n-2)T]\\&\quad+c_{jp}x_{jp}[(n-\tau_{jp}/T)T]\end{aligned} \tag{2-3}$$

$$d_{jp}=e^{-\frac{T}{T_{1jp}}}+e^{-\frac{T}{T_{2jp}}}$$

$$b_{jp}=-e^{-\frac{T}{T_{1jp}}}-e^{\frac{T}{T_{2jp}}}$$

$$C_{jp}=1-e^{-\frac{T}{T_{1jp}}}-e^{-\frac{T}{T_{2jp}}}+e^{-\frac{T}{T_{1jp}}}-e^{\frac{T}{T_{2jp}}}$$

式中　$Y^*_{jp}-(nT)$——为过程输入(干扰变量、控制变量)的动态响应；

T——采样间隔；

n——采样时刻。

4. 用各通道各输入的动态响应 $y^{jp}(nT)$ 取代公式(2-1)中各输入变量的 x_{jp} 得

$$\begin{aligned}\hat{y}(nT)&=a_{jo}+\sum_{p=1}^{6}a_{jp}\{d_{jp}y^*_{jp}[(n-1)T]+b_{jp}y^*_{jp}[(n-2)T]\\&\quad+c_{jp}x_{jp}[(n-\tau_{jp}/T)T]\}\end{aligned} \tag{2-4}$$

公式(2-4)即为该厂 Cu 浮选过程各通道的数学模型。

模型的识别　在 Cu 浮选过程中，因为粗选精矿刮出量和 NaCN 用量随矿性质及药剂质量变化而变化，所以需对 x_{j1}、x_{j2} 和 x_{j3} 的系数 a_{j1}、a_{j2} 和 a_{j3} 及常数项 a_{j0} 进行识别。用一次估计公式进行模型参数的识别，参于识别的数据有 36 组观测值，每隔 5min 收集一次观测值作为最新数据，而把最老的观测值剔去。

目标函数　该厂采用经济效率作目标函数，经济效率是浮选过程实际所得精矿的价值与理论产值之比即

$$R = \frac{\text{浮选过程实际回收所得精矿的价值}}{\text{矿石中所含该种金属的价值}}$$

其具体算式为

$$R = \left[100b_1 \times \frac{\hat{y}_1(\alpha_{Cu} - \hat{y}_2)}{\alpha_{Cu}(\hat{y}_1 - \hat{y}_2)} + b_2\right]\left[1 - \frac{\hat{y}_3 p_{Zn}}{\hat{y}_1 p_{Cu}} - \left(\frac{\alpha'_{Cu}}{\hat{y}_1} - 1\right)\frac{W}{p_{Cu}}\right]$$

最优化方程　该厂使用试行法作最优化搜索的方法。

控制过程描述　该厂最优化控制原理见图 11－2－7)所示，图中 $b_0 - b_3$ 就是公式(2－1)的 $a_{j0} - a_{j3}$ 计算机收集浮选过程的输入参数 $x_1 - x_6$，预报模型计算出生在这些输入变量值的作用下，被调量的估计值 $\hat{y}_1 - \hat{y}_3$，将这些 $\hat{y}_1 - \hat{y}_3$ 代入目标函数式，估计此刻的经济效率 $R(n)$比$(n-1)$时刻的经济率 $R(n-1)$高还是低，程序根据判断的结果，确定控制变量 x_1、x_2、x_3 的搜索方向，把与搜索到的经济效率 R 最高时相应的控制变量值 x_{01}、x_{02}、x_{03} 作为相应 DDC 控制回路的给定值，由 DDC 系统去完成对控制变量的调整。每隔 10min，操作系统启动一次最优控制程序，寻找此刻的最优工况，使得生产过程获得最佳的经济效率。

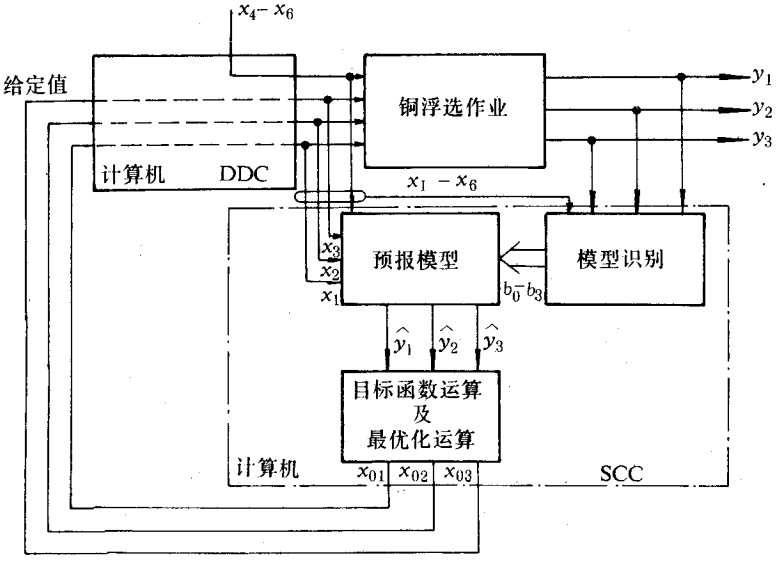


图 11－2－7　皮哈萨尔米选厂最优化控制原理图

第三节　分散型综合控制系统

分散型综合控制系统(简称集散系统),是一种新型的过程控制系统。它以多台(数十台甚至数百台)微型计算机分散应用于选矿生产各个作业进行控制,而全部信息则通过通信网络由上位计算机收集整理。以上位机实现生产管理及对选矿生产过程的最佳化控制。集散系统继承了常规模拟仪表控制系统和计算机集中控制系统的优点,克服了计算机单机集中控制系统危险性高度集中以及常规仪表控制功能单一,人/机联系差的缺点。

一、集散系统基本构成

集散系统的种类很多,但是其基本结构是类同的,它可简化成图 11－2－8 的形式。

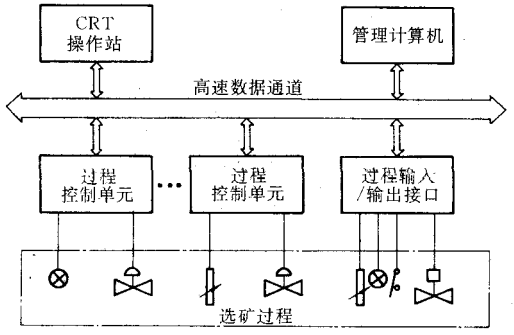


图 11－2－8　集散系统的基本结构

由图 11－2－8 可见,集散系统由以下五大部分组成:

1. 过程输入/输出接口

过程输入/输出接口又称数据采集站,是为过程非控变量专门设置的数据采集系统,它不但能完成数据采集及预处理,而且还可对实时数据完成进一步加工处理,供 CRT 操作站显示和打印,实现开环监视。对该接口要求采集系统容量大,采样速率高,能适用于不同类型的过程变量和各种工艺条件。该接口单元本身就能对所采集的数据进行预处理和存贮。

2. 过程控制单元

又称基本控制器或闭环控制站,是集散系统的核心部分。其控制回路数有 2～64 个

不等，甚至更多。其控制算法有 7～212 种之多，类型有 *PID*、非线性增益、位式控制、选择性控制、函数控制、史密斯大滞后控制及多项式系数等。控制类型有连续控制、批量控制、逻辑控制等。

3. CRT 操作站

是集散系统的人/机接口装置，配有彩色、高分辨率 CRT、操作键盘、打印机和大容量存贮器等。操作站除了执行对过程的监控操作外，系统的组态、编程工作也可在操作站进行。操作站还负责完成部分日常生产管理工作，如班、日报表的显示和打印，用户自己设计的工艺报表及选矿工艺流程图中各指标的动态显示等。

4. 高速数据通道

是一种具有高速通信能力的信息总线，采用双绞线、同轴电缆或光导纤维构成。集散系统各计算机（各站）之间数据的传送，必须将通信系统构成一定的网络，并遵循一定的通信方式才能实现。计算机之间数据传送的通信网络有各种结构和各种规定。

（1）网络结构　集散系统中，常用的有星型、环型、总线型、组合型网络结构等。

①星型网络结构：星型网络结构如图 11－2－9 所示，在网络中各从站只与主站相联。主、从站之间链路专用，传输效率高，便于程序集中研制和资源共享，通信也简单。这种结构主站负责全部信息的协调和传输，负荷很大，系统对主站的依赖性极大，一旦主站发生故障，整个通信就会中断，并且这种系统投资大。

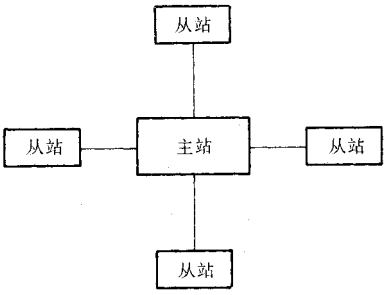


图 11－2－9　星型网络结构

②环型网络结构：环型网络结构如图 11－2－10 所示。网的首尾相联成环型，是集散系统中应用较广泛的一种形式。这种网络信息的传送是从始发站依次经过诸站，最后又回到始发站，数据传送的方向可单向，也可双向。若干站的信息可以同时在环型通路上传输。

该结构的突出优点是结构简单、控制逻辑简单、挂接或摘除有关处理设备也较容易、成本及维修费较低。其主要缺点是可靠性问题，当结点处理机或数据通道出现故障时，会给整个系统造成威胁。

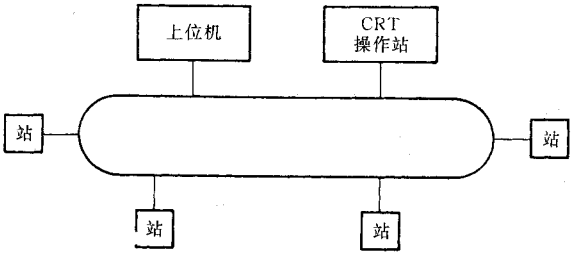


图 11－2－10　环型网络结构

③总线型网络结构：总线型网络结构如图 11－2－11 所示。所有站，包括上位机都挂在总线上，各站有的分主、从，有的不分。因控制通信的方式不同，分为集中控制方式（设有专门的通信控制器，负责通信的控制）；分散控制方式（把通信控制功能分设在各站的通信接口中）。总线型网络结构的性能主要取决于总线的宽度、挂线设备的数目及总线访问规程等。

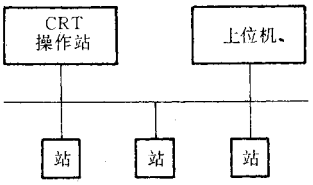


图 11－2－11　总线型网络结构

总线型网络的结构简单，系统可大可小，扩展方便，易于设置备用部件，安装费用低，可靠性较强。该结构也是目前广泛采用的一种网络形式。

④组合网络结构：在比较大的集散系统中，为提高其可用性，常把几种网络结构合理地运用于一个系统中，发挥其各自的优点，如图 11－2－12(a)，是把环型网络和总线网络相结合的系统。图 11－2－12(b)是总线网络和星型网络相结合的系统。

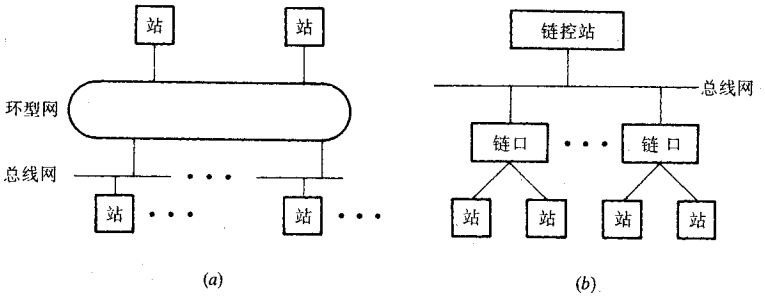


图 11－2－12　组合网络系统

(2)通信网络协议　网络的协议，是关于双方通信过程的一组约定、规则，用它来建

立通信关系，以使数据交换顺利进行。协议包括各种报文的格式，各种命令及响应回答的含意，应答秩序和状态变化规则等。通信网络协议大致分为广播式和存贮转发式两种。

①广播式协议：广播式协议的重要标志，是在同一时间内，只有一个站在发送信息，其它站都在收听。在环型网络和总线型网络中采用此协议较多，该协议根据发送信息的方式不同又分为自由竞争式，通行标记(全牌)式和时间分槽式。

自由竞争式，是各站自由竞争发送信息，当发生冲突时，各站都退回，经随机延时后，再重发信息。这种方式可靠性较高，但软件较复杂。

通行标记式，是接到通信标记后的站才发送信息，当信息发送完以后，又把标记交给下一个站。

时间分槽式，是把一段时间分成若干时间槽，各站在相应的时间槽内发送信息。

②存贮转发式：首先接收信息进行存贮，然后再转发出去，这就是存贮转发式的含意。它多用于环型和星型网络中。

在星型网络中，“存贮转发”常采用询问形式，主站依次询问从站，由从站发信息给主站，再由主站把信息转发给其它从站，这种方式信息响应较慢。在环型网络中，“存贮转发”在每一个结点上发生，目标结点在收到所需的信息后，在信息上加一个确认码，然后把信息放回环路，继续传送，当源结点接到确认码后，才把信息取消。若收到否认码，则源结点启动重发逻辑，进行信息重发。

5. 上位计算机

上位机又称管理计算机，它功能强、速度快、存贮容量大，通过专用通信接口与高速数据通路相联，采集各种数据信息，可用各种高级语言编程，执行厂的集中管理和实现最佳控制、顺序控制、后台计算以及软件开发的特殊功能。

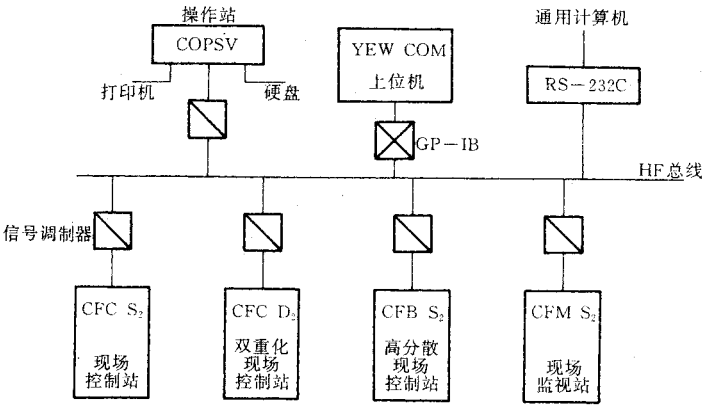


图 11－2－13　CENTUM 系统

集散系统种类繁多,以下是横河电机公司的 CENTUM 系统总线型结构的配置框图。

二、集散系统的主要特点

1. 功能齐全　集散系统可以完成从简单的单回路控制到复杂的多变量模型优化控制;可以执行从常规的 PID 调节规律到史密斯大滞后等各种算法;可进行连续的反馈控制,也可进行顺序控制、逻辑控制;可以实现监控、显示、打印、报警、历史数据贮存等日常的全部操作要求。

2. 人/机联系好,可实现集中监控和管理　操作人员通过 CRT 和操作键盘,可以监视全部生产装置以至整个工厂的生产情况,按预定的控制策略组成各种不同的控制回路,并调整回路的任一常数,而且还可以对机电设备进行各种控制,从而实现了真正的集中操作和监控管理。

3. 系统扩展灵活　集散系统采用模块式结构,用户可根据要求,方便地扩大或缩小系统的规模,或改变系统的控制级别。集散系统采用组态方法构成各种控制回路,很容易对方案进行修改。

4. 安全可靠性高　由于采用了多机的分散控制结构,危险性分散了,系统中的关键设备采用双重或多重冗余,还可设自动备用系统和完善的自诊断功能,能使系统的平均无故障时间达到上万天,平均修复时间不到 15min。整个系统的利用率可达 99.9999% 以上。

5. 安装调试简单　集散系统的各模件都安装在标准机框内,模件之间采用多芯电缆,标准化接插件相联,与过程的联接采用规格化端子板,到中央控制室的操作站只需敷设同轴电缆进行数据传递,布线量大为减少。而安装工作量仅为常规仪表的$\frac{1}{2}\sim\frac{1}{3}$。系统调试采用专用的调试软件,使调试时间仅为常规仪表的$\frac{1}{2}$。

6. 具有良好的性能价格比　在性能上,集散系统技术先进,功能齐全,可靠性高,适用于多级管理控制。在价格方面,80 年代中、后期国外 80 个控制回路的生产过程采用集散系统的投资已与采用常规模拟仪表相当,规模越大,单位回路投资将更低。目前集散系统的性能价格比就更大了。

集散系统的发展从 70 年代中叶开始至今已经历了三个阶段:1975 ~ 1976 是集散系统的诞生时期;1976 年以后,一方面对原有系统硬件和软件采取更新措施,另一方面积极开发高一层次的信息管理系统;1984 年以后,各厂陆续推出第三代集散控制系统——综合信息管理系统。新系统在原有的过程控制层和生产控制管理层的基础上增加了综合

信息管理层，更多地关心高层信息的格式、传输、处理、存贮，共享等问题。预计高层次的集散控制系统将以企业网的形式加入区域计算机网或远程网中。

国际上，80 年代中、后期装备的选厂计算机控制系统已开始采用集散系统。我国于 80 年代也开始应用集，散控制系统，但主要用在化工等部门。我国大型选厂的现代化管理和控制也必将采用先进的集散控制系统。