

# 工程控制系统

《过程计算机控制系统》

下 册

姜宝之

上海工业大学

一九八一年三月



# 目 录

## 第一章 概述

引言 .....	1-1
§ 1-1 生产过程的巡回检测及数据处理 .....	1-1
§ 1-2 开环计算机监督控制系统 .....	1-2
§ 1-3 直接数字控制系统 (DDC 系统) .....	1-4
§ 1-4 监督计算机控制系统 .....	1-5
§ 1-5 分级控制系统 .....	1-7

## 第二章 最优控制和自适应控制系统 .....

2-1

§ 2-1 最优控制的概念 .....	2-1
§ 2-2 数学模型的建立 .....	2-14
§ 2-3 最优控制方法与系统 .....	2-39
§ 2-4 自适应控制系统 .....	2-77
§ 2-5 分级控制系统 .....	2-87
§ 2-6 静态最优控制系统应用举例 .....	2-95
§ 2-7 动态最优控制系统应用举例 .....	2-109

## 第三章 分散型综合控制系统 .....

3-1

§ 3-1 概述 .....	3-1
§ 3-2 分散型综合控制系统的组成 .....	3-9



# 第一章 概述

## 引言

在中册里我们讲过了过程常规仪表控制系统，在这一册里要讲过程计算机控制系统。计算机控制系统是在常规仪表控制系统的基础上，随着计算机的发展和工业生产的要求而发展起来的。目前，在国外正在大力发展以微处理机为核心的分散型控制系统和分级控制系统，在我国正在加强这方面的工作，进行过程计算机控制的试验和推广，努力向计算机控制这个发展阶段迈进。

总的来说，应用计算机对生产过程进行的各种控制，虽有不少进展，但还未达到令人满意的程度，和军事及空间技术领域内计算机的应用相比，还有很大差距。其原因主要是由于控制计算机的可靠性不够高，连续运行时间不长，特别是在最优监督控制系统中，建立对象（过程）的数学模型比较复杂，以及工控机在工业生产过程中如何更好地应用等问题，均尚待进一步研究解决。

计算机用于工业生产过程控制的种类很多，因而有各种不同的分类方法，若按工控机的应用来分，有如下几节类型。

### § 1-1 生产过程的巡回检测及数据处理

严格说来，它不属于计算机控制，它只为大工控制发展为自动控制提供资料，因此也可把它看作是计算机应用于工业控制的低级阶段，其构成形式如图 1-1 a 所示。图中的 CPU 为中央处理机，是指计算机本身，不包括输入、输出和外围设备，其功能是将生产过程的各种参数经测量仪表，信号统一后再通过模数转换器定时地巡回采集到计算机中，然后由计算机作必要的数据处理，如数字滤波，仪表校正，成本核算，越限比较等，有越限时就进行声光报警，按人工请求随机打印和选点显示，或按要求定时制表打印或将数据处理的结果用磁带等记录在外存贮器内，以作为资料保存和进



一步分析用，这对于探求进一步自动控制用的数学模型是十分需要的。

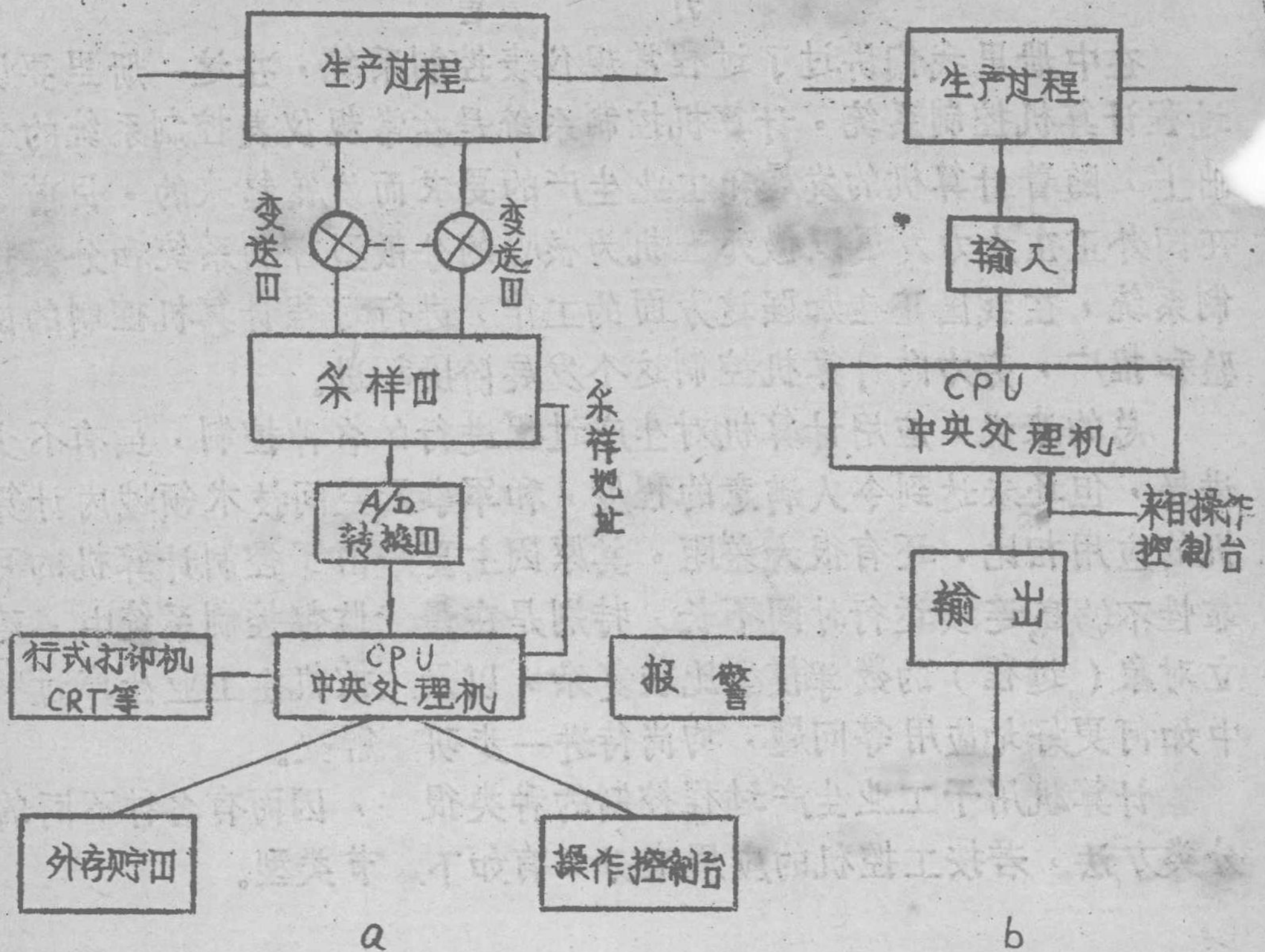


图 1-1 计算机数据处理系统的一般结构图

### § 1-2 开环计算机监督控制系统

所谓开环计算机监督控制系统是指根据生产过程提出的数学模型在计算机上计算并寻找生产过程的最优状态或最优操作条件，由计算机把算出的最优操作条件通过打印输出等显示方式作为操作人员的指导，再由操作人员去改变模拟调节器的给定值，把生产过程控制在最优状态，从而达到提高产量、质量、降低消耗等不同的指标。它的构成如图

1-2a 所示（更简单的框图如图 1-2b）。这种方法的优点是安全地试验新方案、新设备；或在闭环控制之前先进行开环控制运行，



以便考核计算机的工作，也可以训练一些不熟悉控制方法的人员。  
 缺点是仍要人工操作，速度受到限制，同时要控制很多回路就不可能。

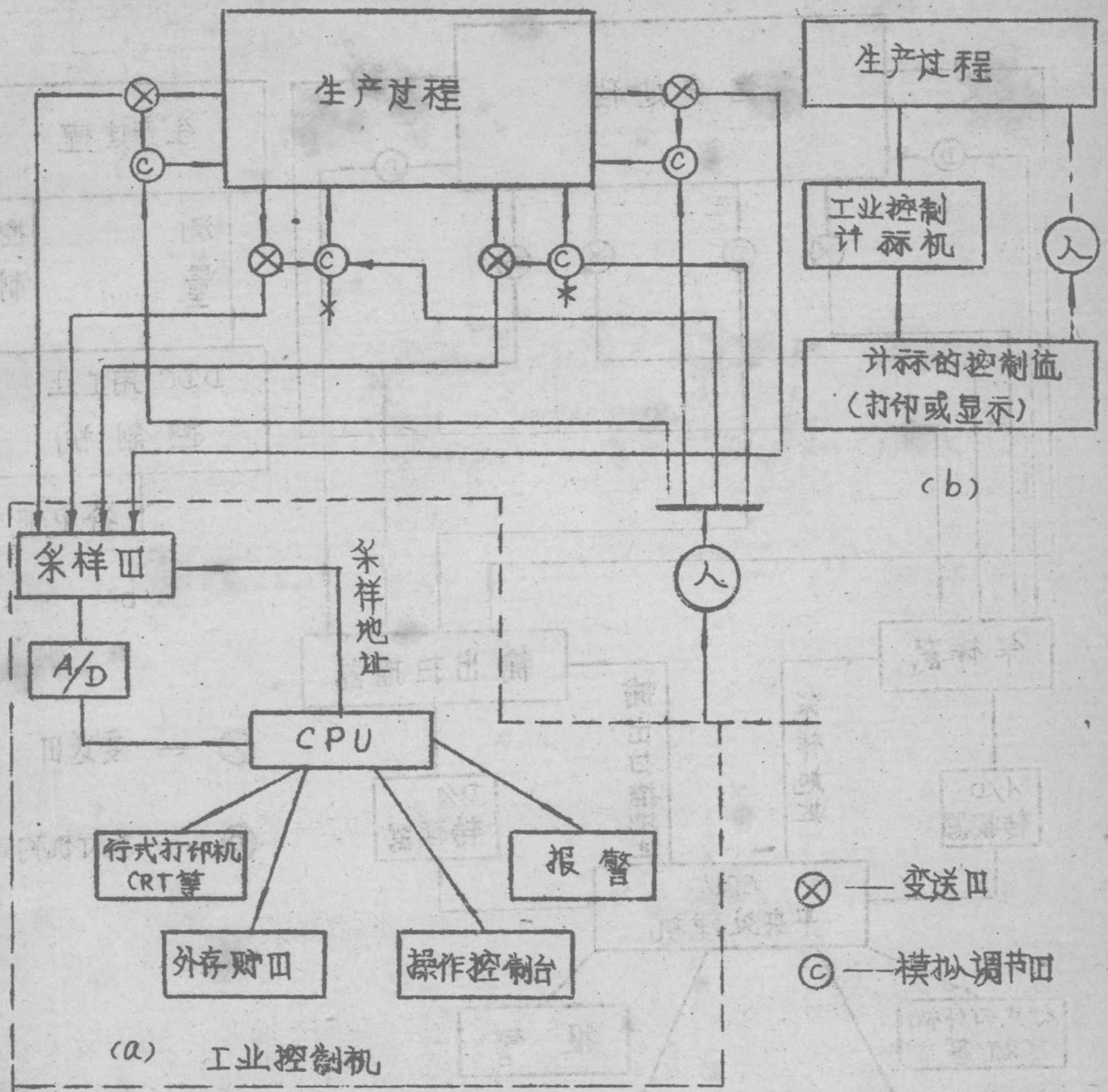


图 1 - 2 开环计算机监督控制系统框图



§ 1 - 3 直接数字控制系统  
(简称 DDC 系统)

所谓 DDC ( Direct Digital Control ) 系统, 是指计

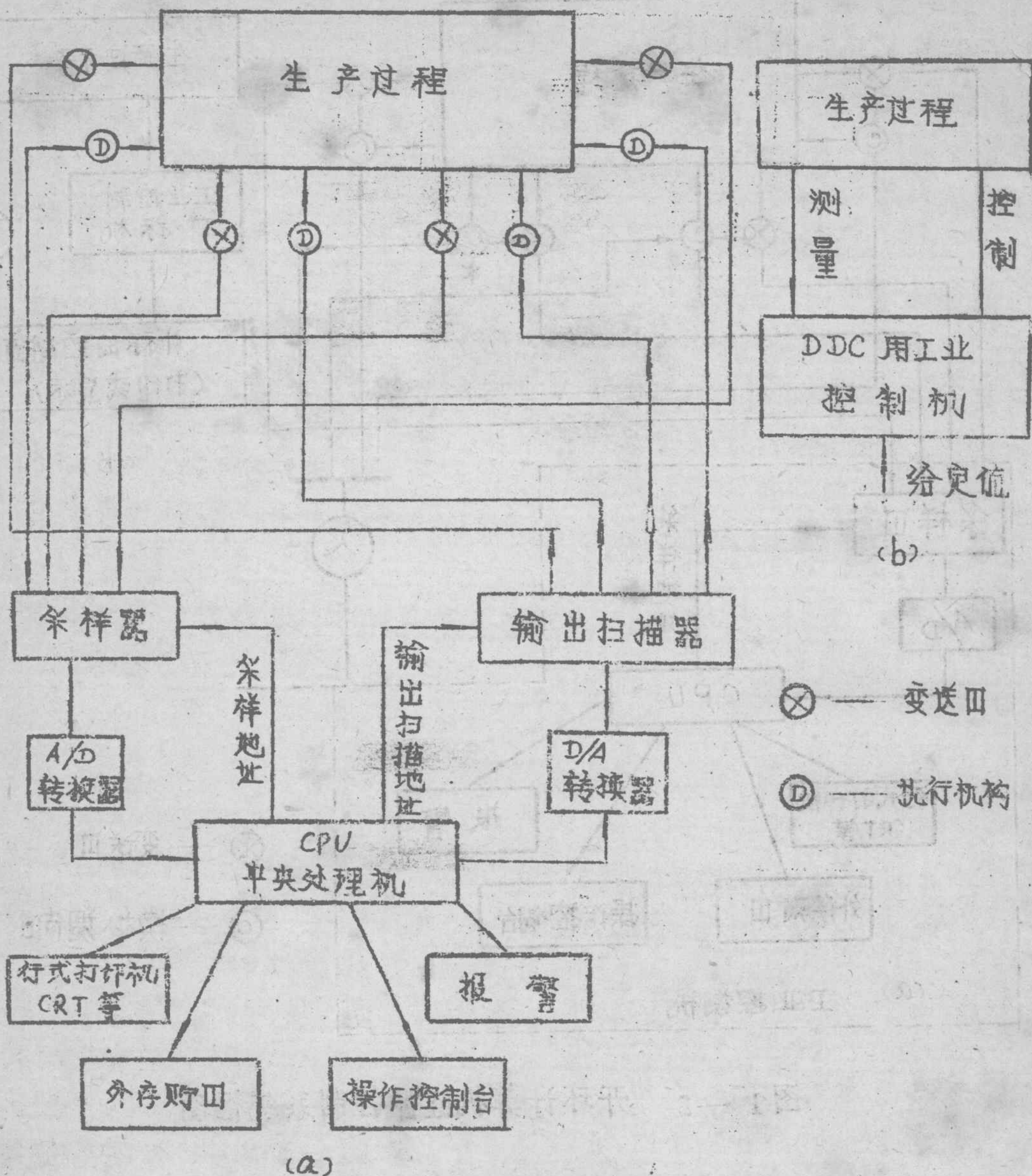


图 1 - 3 DDC 系统框图



计算机在参加闭环控制过程中，省掉了模拟调节仪表，而用计算机的输出（断续的形式），直接去控制调节阀等执行机构，使各个被控参数保持在给定值。它的构成如图 1-3 a（更简单的框图如图 1-3 b）所示。

DDC系统的特点是，不但计算机完全代替了模拟调节器，实现几十个甚至更多的单回路的 PID 控制，而且还能比较容易地实现其它新型规律的控制，如串级控制、前馈控制、自动选择性控制、纯滞后控制等。除了主要作 PID 运算外，还能集中进行显示，报警和打印报表等。它的给定值在操作控制台面板上由人工给定。

DDC系统的优点是省掉了大量的模拟仪表，当控制回路较多时（例如大于 50 个回路），在经济上是合算的。它把显示、记录、报警和给定值设定等都集中在操作台上，给操作人员带来很大方便，只要改变程序即可实现上述各种新型控制规律。其缺点是要求工控机的可靠性很高，否则会直接影响生产。

一般的 DDC 仅作常规的控制规律运算，没有最优化计算，后来发展的 DDC-II 型系统，还能包括最优化计算，故一般称为最优化的 DDC。

随着计算机技术的发展，特别是微型计算机的出现，有可能用不同的计算机来实现不同的功能，进而组成分散而又集中的系统。

#### § 1-4 监督计算机控制系统

监督计算机控制系统简称 SCC 或 SPC 系统，又称最优控制系统。所谓 SCC (Supervisory Computer Control——简称 SCC 或 Supervisory Process Computer Control——简称 SPC) 系统，是指计算机根据生产过程的信息（测量值）和其它信息（给定值等），按照描述生产过程的数学模型（或者采用其它方法），去自动改变（也称重新设定）模拟调节器或 DDC 工控机的给定值，从而使生产过程处于最优化的工况下进行。这种监督计算机控制系统，可以分为以下两种型式：

##### (1) SCC 加模拟调节器的控制系统



如图 1-4 所示的工控机测量生产过程中的有关点，根据机内贮存的数学模型进行计算，同时根据优选的条件求得各个控制回路的给定值，然后由各回路的模拟调节仪表（如 PID 仪表）进行调节。它的优点是可实现最优化控制，达到省料、高产、低消耗，而且较为安全，当计算机出故障时，由模拟调节仪表独立完成操作。缺点是仍要常规的模拟仪表。

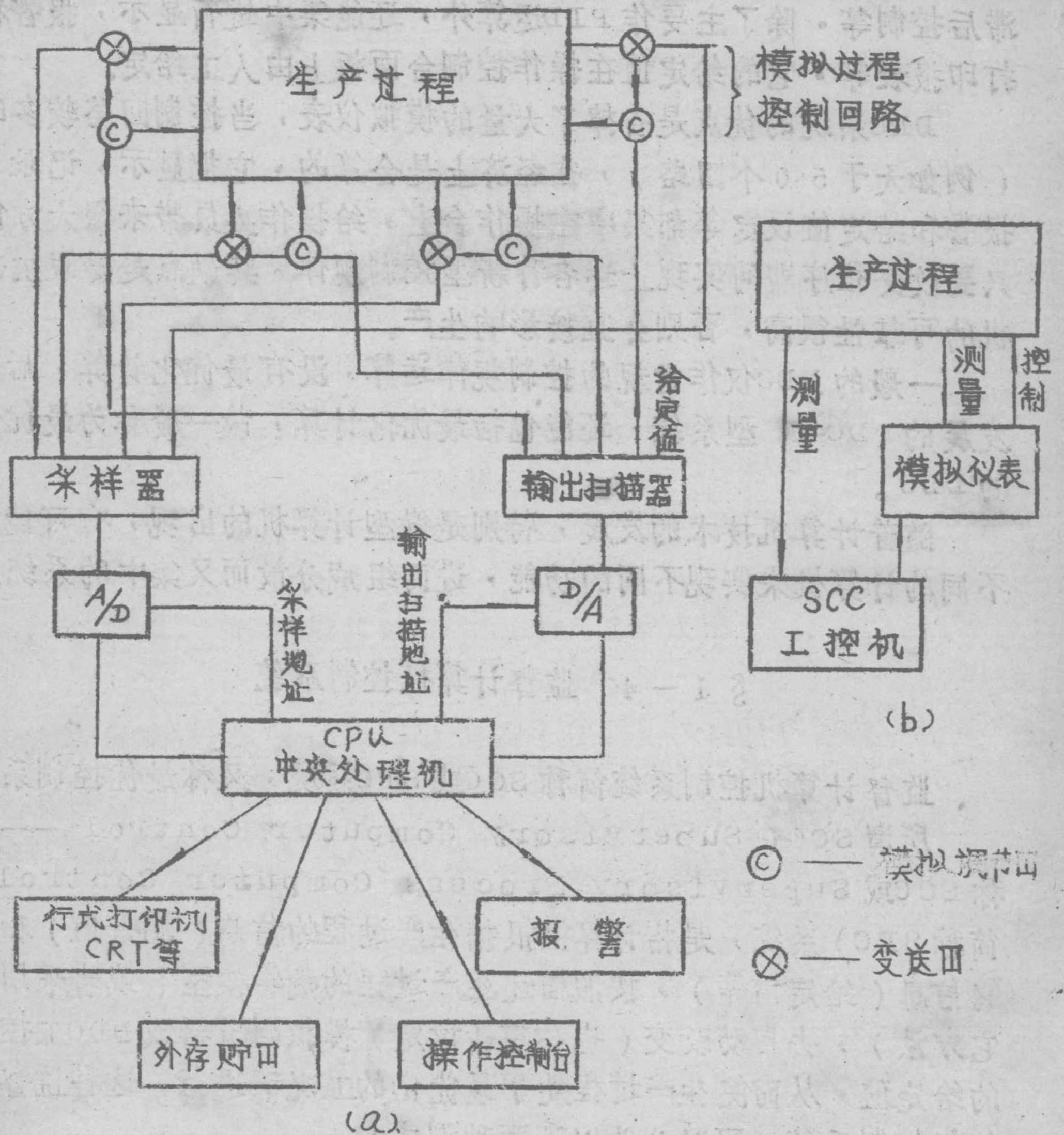


图 1-4 SCC 加模拟调节器控制系统框图



(2) SCC加 DDC的控制系统 (见图 1-5)

在此控制系统中, SCC计算机和 DDC计算机之间是通过信息进行联系的, 可简单地进行数据传送。SCC计算机负责工段、车间的最优化计算, 并将其算出的最优化操作条件, 去重新设定 DDC计算机的给定值, 然后由 DDC计算机执行过程控制, 使工况保持最优。当 DDC计算机出故障时, 可由 SCC计算机代替 DDC的功能, 使生产确保安全。

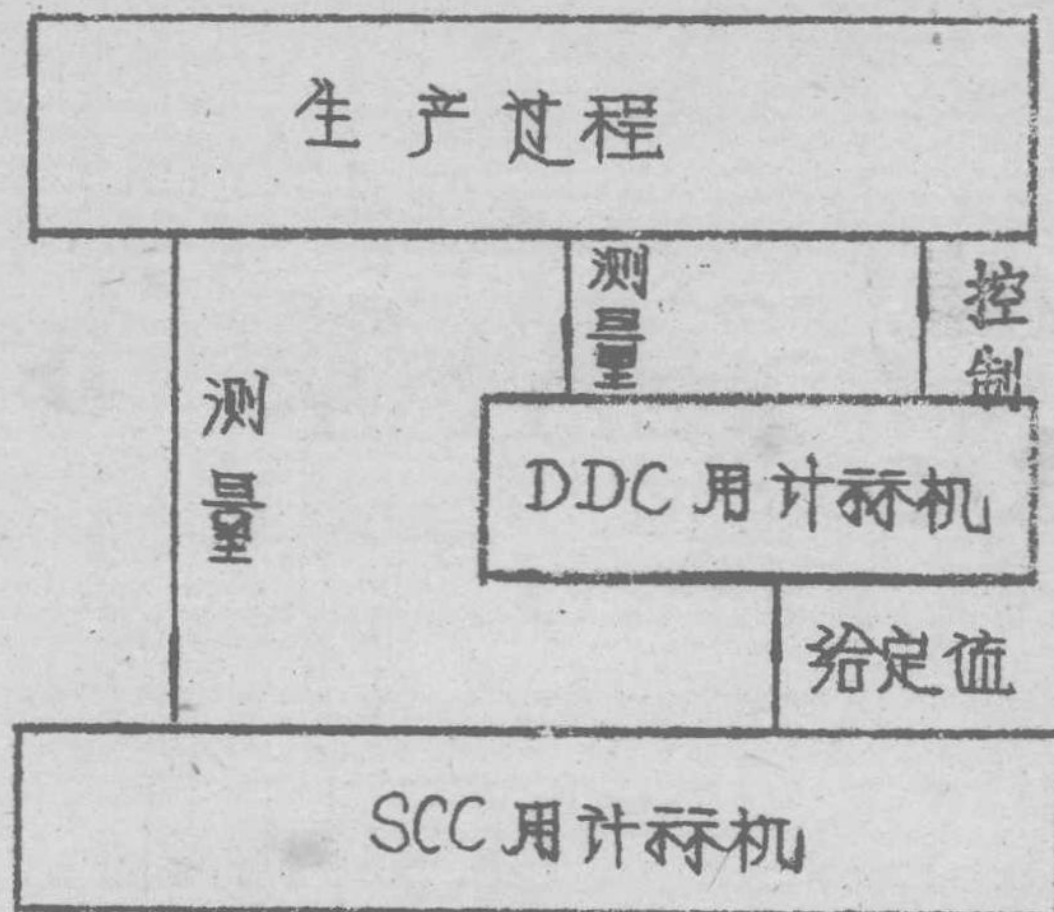


图 1-5 SCC+DDC 系统框图

从上述可看出, DDC和 SCC两种方式的根本区别在于控制是否直接驱动调节阀, 而不在于是否完成最优工况的计算。如果条件具备, 控制机在进行最优化计算的同时也可兼作 DDC。它是计算机应用的高级形式, 即最优化的 DDC。

§ 1-5 分级控制系统

分级控制系统是由多个计算机组成, 其中最高级的是具有经营管理功能的分级系统。分级系统一般是混合式的, 即除计算机直接



控制外，还有仪表控制和直接联接现场的执行机构。目前分级控制系统正在发展阶段，较多的还仅是二级系统，即SCC加DDC（或仪表）系统。

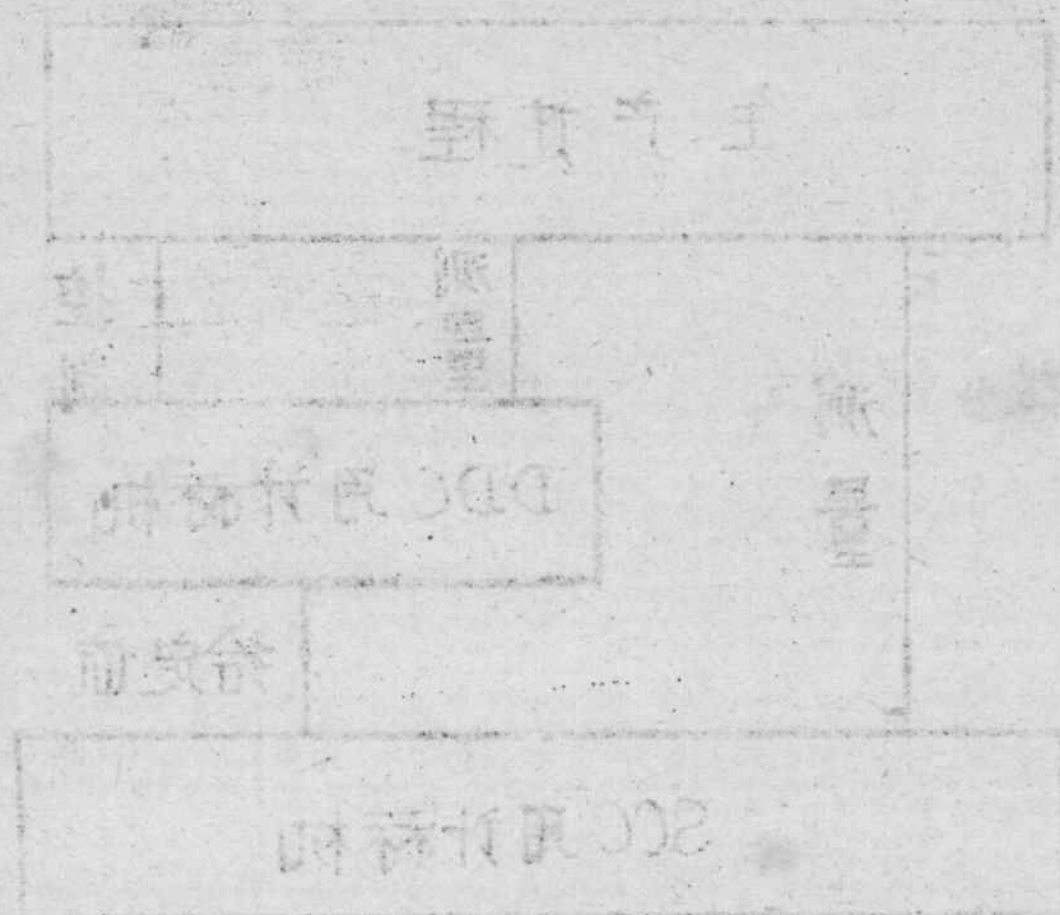


图 1-8 SCC+DDC 控制系统

从上述可以看出，DDC+SCC 系统在本级最广泛地应用于控制对象。SCC 系统对下级 DDC 系统起着协调作用，而不直接参与对象的控制。如果系统具有 DDC 系统，那么 SCC 系统的作用就显得尤为重要。SCC 系统的作用主要是协调 DDC 系统的运行，使其在满足上级控制要求的前提下，实现最优控制。

图 1-8 二级控制系统

SCC 系统不是由多个 DDC 系统组成的，而是由一个 SCC 系统协调多个 DDC 系统组成的。SCC 系统的作用主要是协调 DDC 系统的运行，使其在满足上级控制要求的前提下，实现最优控制。



## 第二章 最优控制和自适应控制系统

最优控制是控制技术发展的一个重要方向，而数字计算机是实现最优控制的有力工具。本章将在第一章的基础上讲解计算机最优控制系统，主要内容是最优控制的概念，数学模型的建立，最优化方法；最优化方法包括静态最优和动态最优。静态最优主要讲多变量函数最优化的解析法和搜索法；动态最优主要讲连续过程的最优控制和时间最优控制。

计算机分级控制系统，即大系统，是当前工程控制发展的一个重要方向。

自适应控制系统是最优控制研究的一个重要分支。

### § 2-1 最优控制的概念

在这一节里讲两个内容，即最优控制的概念和分析与综合最优控制的方法——状态空间法。

#### 一、最优控制的概念和分类

前几章所讨论的单变量，多变量控制系统，都是通过综合控制规律的途径，保证被控参数在工艺要求的给定值上（定值控制系统），或按照某个信息实行跟踪（随动控制系统）。这种控制系统通常用设定值与被控制参数的偏差或偏差的积分来度量系统的控制质量。在局部范围里，它是合理的。但在稍大一点的范围里，它就显得有缺陷，甚至不适用了，因而要采用另外的质量指标。即在下面将要讲到的最优指标。

一个生产过程，装置乃至其中的装置，总存在着许多参数，它们之间相互联系又相互制约，形成多变量系统。为了最大限度地发挥设备的生产潜力，提高收率和降低消耗，就必须对过程的有关操作参数在工艺约束条件下提出“最优”的要求。在工艺设计阶段，考虑这一问题就是一个最佳化设计的问题，而在运行过程中，通过一定的控制手段来实现上述要求就是一个最优控制问题。在实际生



产过程中，这类问题是很多的。如一个化学反应器在怎样的操作条件（温度、压力、流量等）下，才能使得转化率最高；一个精馏塔如何在防止液泛的约束条件下，保证其产品的纯度最高，能量消耗最小，又如电厂锅炉在怎样的操作条件下，在保证蒸汽产量、质量前提下所消耗的燃料最少等。

因此，实现最优控制首先遇到的一个问题是最优指标的选择，其次是由对象数学模型及最优指标，决定最优控制的轨迹。所谓最优控制，就是在一定的限制条件下（例如控制作用的极限值，工艺参数的极限值，工艺参数相互间的依赖关系），选择一个表征过程的目标函数（例如产量最高，收率最高，消耗最少，控制质量最好，达到给定值的时间短等），决定一个最优控制函数（如对调节器的给定值，或是直接加到执行机构上的信号），以使目标函数达到极大值或极小值。

本章要介绍的最优控制，是属于具有最优指标的类型，正确选择最优控制的目标函数是实现最优控制系统设计的首要问题。自然，选择的目标函数不同，最优控制系统所涉及的范围也就有很大的差异。

最优控制可以归结为两大任务：

(1) 在不同工况下，为保持目标函数最优，决定系统中有关控制回路的设定值（即给定值）。

(2) 为实现某种最优控制目标的最优控制规律，即设计一个最优控制器。

根据最优控制的两大任务，相应地也可以把最优控制分为动态最优和静态最优，两大类：

#### 1. 动态最优控制

动态最优问题就是根据整个动态过程来综合考虑设计指标，以寻求使目标函数成为极值的控制作用的值，例如使偏差值平方的总合达到最小，又如在满足一定约束条件下使达到预期的目的而所化的时间最短，或所消耗的燃料最省，等等。

以动态最优进行系统的控制是近代控制理论和实践的重要内容，它从时间域和状态空间的概念出发，采用变分法，最大值原理，动



态规划等方法进行研究，根据不同的要求可以设计出不同的控制规律，就是说动态最优控制要解决的问题是设计一个最优控制器，把控制对象和最优控制器加在一起就是所谓的最优控制系统。由于最优控制系统需要采用较大存贮量和较快运算速度的电子计算机，计算方法和数学模型相对于一般控制来说要复杂得多。因此，目前主要应用于要求特别高的场合，例如在导弹，宇宙飞行器的控制等。其它科研方面也有应用，在一般工业生产中现已逐步开始使用。

在实际的控制系统中，正向通边对于控制来说起一个校正和提供功率的作用，而反馈通边则起着测量和求取偏差的作用，测量本身存在较大误差则控制也必然不可能精确。在实际工业生产和其它领域中，测量过程总伴随着“噪声”，使测量的结果存在着无法简单消除的误差。为了要达到真正的最优控制，必须对测量的数据进行预处理，这就是所谓“最佳滤波技术”，或称“卡尔曼 (Kalman) 滤波”。最佳滤波采用随机过程的理论，以最小均方根差为准则来估计或预测当时或以后时刻的测量值。它的应用十分广泛，尤其在军事上十分有用。

## (2) 静态最优控制

我们在生产过程的检测中要全面衡量控制的质量指标，因此仅仅考察动态过程是不够的，还将根据全面指标最优的要求去适当改变各个控制回路的给定值（当然，对于一个具体的控制回路来说，还同时希望动态品质要求，甚至动态最优）。这一类的控制属于计算机自寻最优工况，或说是静态最优控制，简称“最优化控制”，用计算机实现静态最优的控制系统称为监督计算机控制（简称 SCC）系统。

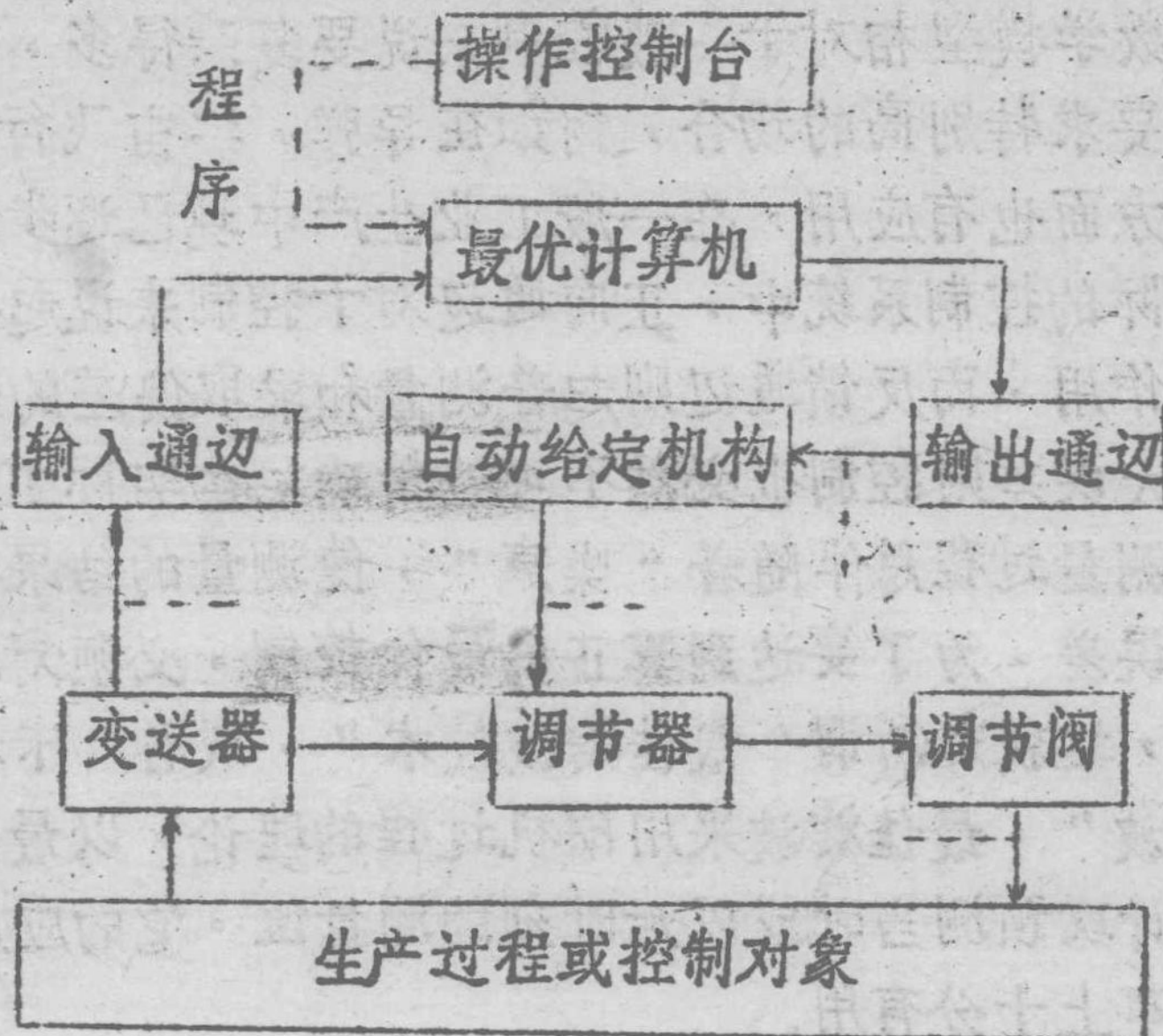
最优化控制的关键是要选择一个能反映客观实际的数学模型它包括选择一个合适的综合指标，以及一系列计算各控制回路给定值的公式。在很多情况下，这种计算公式是不能得到的，因此只能用计算机在线测量参数，然后探索性地进行控制，逐步求得最优化工况。

自寻最优工况的方法，有对象的静态数学模型时，可采用分析法或搜索法；在无法求得或无需对象数学模型时，可采用计算机在

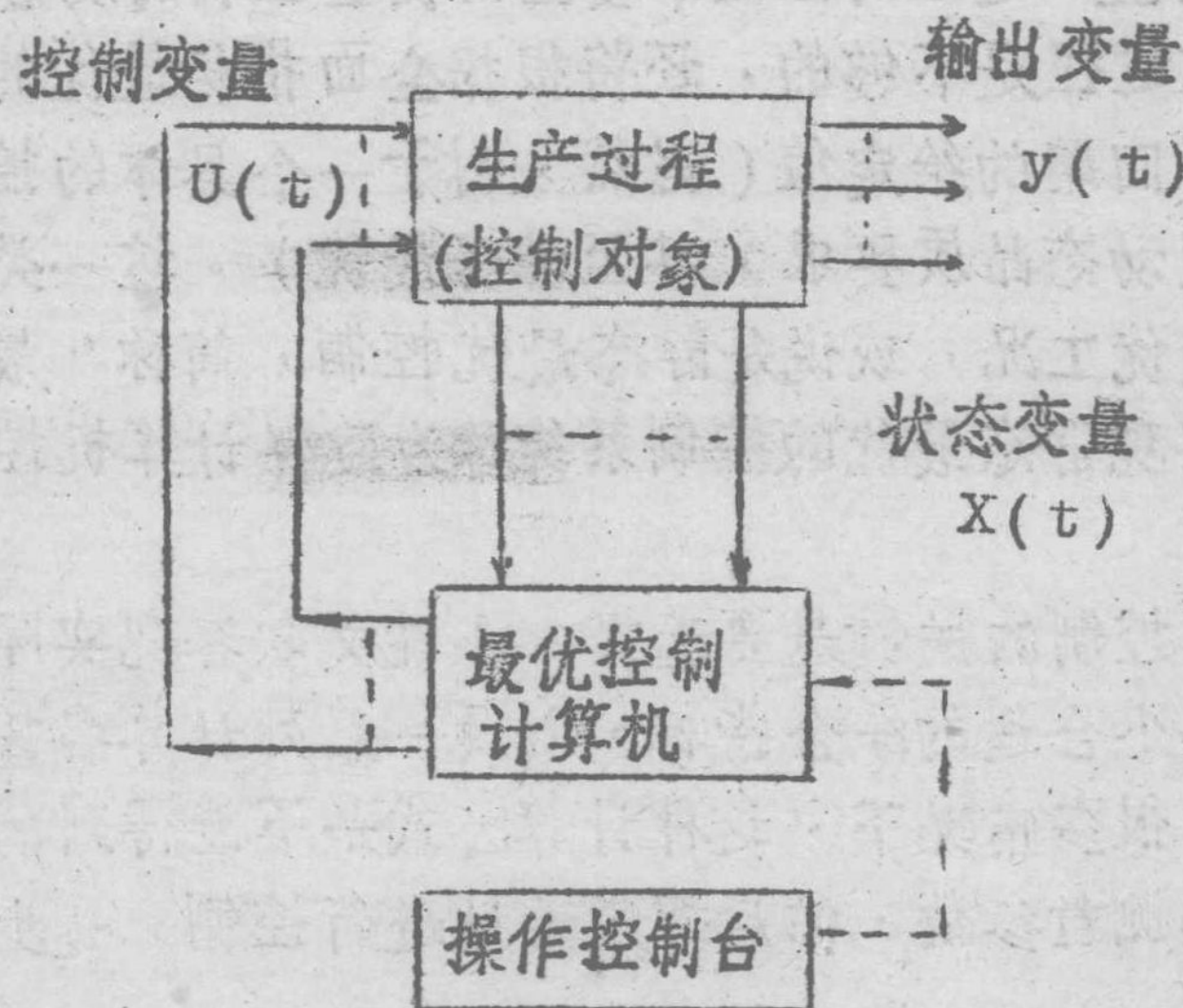


线搜索法。但是目前用得较多的仍是数学模型法。

用计算机实现最优控制的方框图如图 2-1 所示，图 2-1 a 中的调节器也可用 DDC 计算机来代替。



(a)



(b)

图 2-1 计算机最优控制系统方框图



### 三 状态空间法

在这里不全面介绍状态空间法，而是将有关部分从自动控制理论中摘出归纳于此，以便引用。

在状态变量分析法中，常把涉及控制对象或过程的变量分成三类，即所谓输入变量  $U$ ，输出变量  $y$  和状态变量  $X$ ，输入变量  $U$  和状态变量  $X$  结合起来决定状态变量的变化率，状态变量  $X$  和输入变量又结合起来决定输出变量  $y$ 。为清晰起见，以上所述可用图形和关系式表述如下：

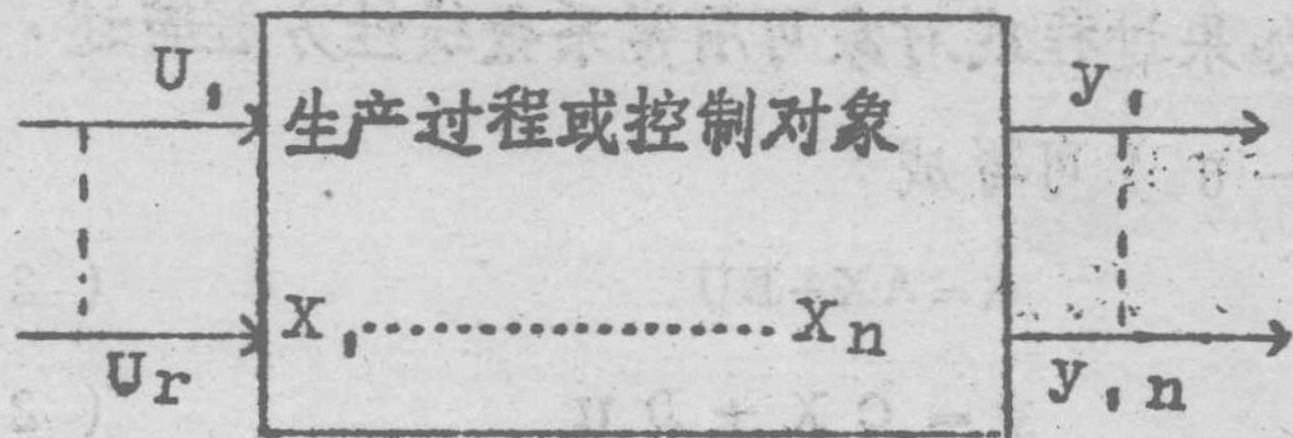


图 2-2 涉及对象或生产过程的三类变量

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= f_1(X_1, \dots, X_n, U_1, \dots, U_r) \\ &\vdots \\ \dot{X}_n &= f_n(X_1, \dots, X_n, U_1, \dots, U_r) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{状态方程} \\ (2-1) \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \phi_1(X_1, \dots, X_n, U_1, \dots, U_r) \\ &\vdots \\ y_m &= \phi_m(X_1, \dots, X_n, U_1, \dots, U_r) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{输出方程} \\ (2-2) \end{array}$$

为了简化书写，引入向量表示法，使：

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_r \end{bmatrix}$$



这里的  $X$ 、 $y$  和  $U$  分别称为状态向量，输出向量和输入向量，于是上列两类方程可以写成：

$$\dot{X} = F(X, U) \quad (2-3)$$

$$y = \psi(X, U) \quad (2-4)$$

如果过程或对象可用线性方程描述，则上两式可写成：

$$\dot{X} = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (2-5)$$

$$y = C(t)X(t) + D(t)U(t) \quad (2-6)$$

而如果过程或对象可用常系数线性方程描述，则式(2-5)和(2-6)可写成：

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2-7)$$

$$y = CX + DU \quad (2-8)$$

其中  $A$  是  $n \times n$  矩阵，称为系数矩阵；

$B$  是  $n \times r$  矩阵，称为控制矩阵；

$C$  是  $m \times n$  矩阵，称为输出矩阵；

$D$  是  $m \times r$  矩阵，称为传递矩阵。

如果把变量之间的关系用方框图表述，则如图 2-3 所示。

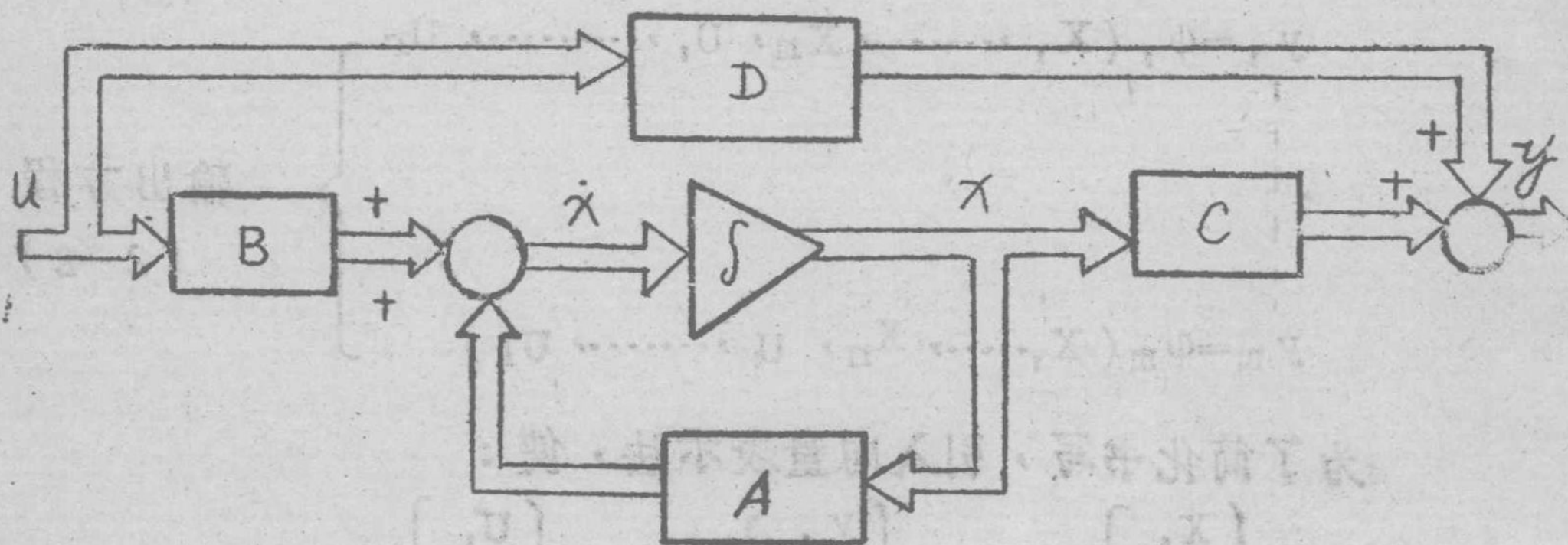


图 2-3 过程或对象的状态变量表述方框图



为了简化问题，以下叙述，仅就线性常系数系统进行讨论。这样，为了描述对象或过程的动态方程特性，只需列写出状态方程和输出方程就可以了，也就是说，只需针对给定的  $U$ 、 $y$  和选定的  $X$ ，写出  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四个矩阵就行了。

当知道了描述对象过程的输入，输出关系的微分方程式如下式时：

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_2 \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_1 U_1 + \dots + b_r U_r \quad (2-9)$$

则取：

$$X_1 = y$$

或者： $y = X_1$

$$X_2 = \frac{dy}{dt} = \dot{X}_1$$

$$X_n = \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} = \dot{X}_{n-1}$$

$$\dot{X}_{n-1} = X_n$$

而  $\dot{X}_n = \frac{d^n y}{dt^n} = -a_1 X_n - a_2 X_{n-1} - \dots - a_{n-1} X_2$

$$-a_n X_1 + b_1 U_1 + \dots + b_r U_r$$

于是得：

$$\dot{X} = A X + B U \quad (2-10)$$

$$y = C X + D U \quad (2-11)$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad 2-7$$