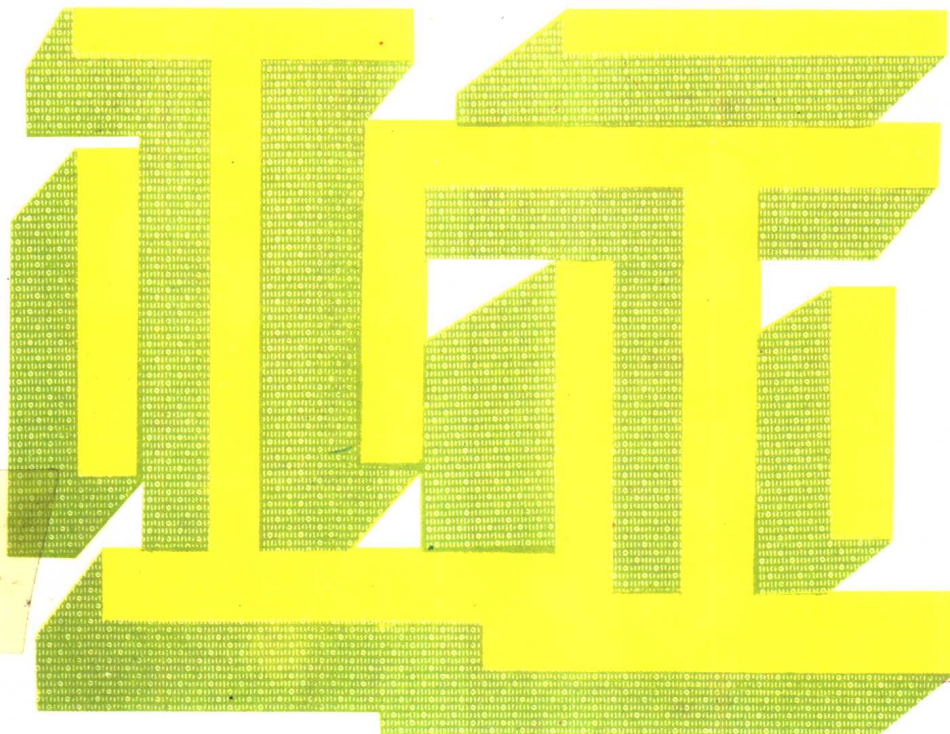


现代控制理论及其应用丛书

计算机控制系统

JISUANJI
KONGZHI XITONG

吴捷 编著



广东科技出版社

《现代控制理论及其应用》丛书

计算机控制系统

吴 捷 编著
周其节 审校

广东科技出版社

粤新登字 04 号

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统/吴捷编著. —广

州: 广东科技出版社, 1994. 7

ISBN 7-5359-1273-7

I. 计…

II. 吴…

III. 计算机控制, 系统

IV. TP273

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路 11 号 邮政编码 510075)

经 销: 广东省新华书店

排 版: 广州市科新电脑技术服务中心

印 刷: 广东新华印刷厂

规 格: 850×1168 1/32 印张 11.5 字数 280 000

版 次: 1995 年 2 月 第 1 版

1995 年 2 月 第 1 次印刷

印 数: 1—1 200 册

ISBN 7-5359-1273-7

IP·29 定价: 12.00 元

《现代控制理论及其应用》

丛书编委会

主编：关肇直 李伯天

编委：(以姓氏笔划为序)

王恩平 王朝珠 卢桂章 刘永青

李伯天 李树英 陈翰馥 吴捷

周其节 秦化淑 涂肇生

7525-01

内 容 简 介

本书系统地阐述了计算机控制系统的构成原理、特点、控制算法及其分析与设计方法。

书中将经典数字控制理论、现代控制理论与计算机硬件、软件相结合,对工业过程中有广泛应用的各类计算机控制系统作了较完整的论述。在重点讨论了常规计算机控制系统的分析与设计的同时,对一些先进的计算机控制技术(例如最优化方法、最优控制、自适应控制和模糊控制等)也作了具体的介绍。全书注意理论与实践相结合,引用了较多的应用实例。

本书可供自动控制、计算技术、工业自动化仪表等方面的科技工作者及高等院校有关专业的师生参考。

出版说明

现代控制理论是一门应用性很强的基础学科，它是现代工业生产自动化和国防科学技术现代化不可缺少的理论基础之一。随着工业生产的发展和科学技术的进步，在大量工程实践的基础上，自动控制理论由古典调节原理发展成现代控制理论。尤其是数字电子计算机的广泛应用，为自动控制理论的应用开辟了广阔的途径，而大量的工程实践又为这种理论的发展提出了许多新的问题，有待于广大工程技术人员和科研工作者进一步研究和探讨。为了向我国的工程技术人员、科研工作者和高等院校教师、高年级学生和研究生介绍已经成熟的并在实际中能够应用的自动控制理论，我们出版这套《现代控制理论及其应用》丛书，以便能使这门基础学科为我国的四个现代化服务。

这套丛书既包括自动控制中的基本理论，又包括这些理论的应用，力求做到为广大工程技术人员易于接受。在理论与应用之间，我们更侧重于新理论的应用。因此，在丛书的选题上不是追求理论的完备性，而是着重介绍那些学了之后能直接应用的内容。

丛书的主要内容包括，线性系统理论、计算机控制系统、估计理论、系统辨识、最优化方法、自适应控制系统、最优控制等等。

这套丛书是由关肇直教授生前主编的，参加编写丛书的单位有华南理工大学、中国科学院系统科学研究所和南开大学。关肇直教授是我国著名的数学家和控制论学者，自1962年至1981年，他以极大的热忱，投身于控制理论的研究、传播与应用。他不仅自己做了大量卓有成效的工作，而且在20年间培养

了一大批从事控制理论研究及其应用的中青年科学家。丛书的作者们大都得益于他的帮助和教导。生前他曾任中国自动化学会副理事长、中国系统工程学会理事长、国际自动控制联合会控制理论专业委员会委员、中国科学院数学研究所副所长、系统科学研究所所长等职。丛书的现任主编为华南理工大学副校长李伯天教授。

丛书的作者们既具备一定的理论修养，又都在不同的领域从事过各种实际问题的研究设计工作，具有一定的实践经验。

丛书可供从事自动控制，计算技术，自动化仪表，系统工程等专业的大专院校师生，工程技术人员作为参考书，也可作为有关专业研讨班的培训教材。

目 录

第一章 计算机控制系统概论	1
第一节 计算机控制系统的特点及其组成	1
第二节 计算机控制系统的硬设备与软设备	4
第三节 数字计算机在控制系统中的作用	31
第四节 计算机控制系统的设计步骤	36
第五节 一个典型的微型计算机控制器	41
第二章 直接数字控制	53
第一节 计算机控制系统中的信号变换	53
第二节 过程模型	65
第三节 阶跃响应法	69
第四节 频率响应法	77
第五节 系统辨识方法	80
第六节 PID 控制	84
第七节 大林 (Dahlin) 算法	87
第八节 卡尔曼 (Kalman) 算法	94
第九节 PI 与 PID 控制器的整定	99
第十节 品质最优化的 PID 整定方法	102
第十一节 基于误差积分准则的控制器参数整定法	110
第十二节 模拟与数字滤波	114
第十三节 串级控制	122
第十四节 前馈控制	126
第十五节 史密斯线性预测控制	130
第十六节 设计实例——热交换器控制系统	134
第三章 最优化方法	141
第一节 经典最优化方法	141

第二节	线性规划问题	163
第三节	非线性规划问题	184
第四章	状态空间分析与设计	211
第一节	状态空间的基本概念	211
第二节	信号转移流图	215
第三节	离散时间系统状态方程的建立	219
第四节	脉冲传递函数的程序设计法	230
第五节	非周期响应控制系统的设计	238
第六节	二次型最优控制系统的设计	250
第七节	状态观测器	262
第八节	预先指定特征方程的数字控制器	272
第九节	模态控制	274
第十节	史密斯预测器在多变量系统中的应用	276
第十一节	解耦控制	281
第五章	自适应控制	286
第一节	自适应控制的基本概念	286
第二节	参数自适应控制系统的设计	288
第三节	理想模型参考自适应控制系统的设计	296
第四节	自校正调节系统的设计	311
第六章	模糊控制	322
第一节	模糊控制的基本概念	322
第二节	模糊集合	326
第三节	模糊关系	332
第四节	模糊语言与模糊算法	335
第五节	模糊控制器	341
参考文献		353

第一章 计算机控制系统概论

第一节 计算机控制系统的特点及其组成

电子数字计算机在 1958 年开始应用于生产过程自动控制, 现已逐渐成为自动化控制的重要工具。数字计算机由于具有存储大量数据, 对数据进行处理, 并根据所得结果作出合理判断的能力, 因而可与生产发展所要求的自动化技术日益提高相适应, 构成种类繁多的计算机控制系统。

在控制系统中, 计算机可以用来进行数据收集与处理、顺序控制与数值控制、直接数字控制(反馈或前馈控制)、监督控制、最优或自适应控制、自动管理与调度等项任务。

由模拟硬件构成的控制系统, 其主要的缺陷是缺乏灵活性, 因为控制方案必须由模拟硬件去完成, 而且控制功能必须与硬件一一对应, 要改变控制方案就要更换模拟硬件。

计算机控制系统把计算技术与自动控制相结合。与由模拟硬件构成的系统相比, 此系统具有下列几个显著特点。

(1) 程序控制 任何一种控制规律的实现, 都可以程序化。因而控制规律的改变, 只不过是程序的改变而已。

(2) 数字控制 出入于数字计算机的信息, 是离散的数字信息, 这种信息在时间上和数值上都是离散的。但由于过程的控制变量与状态变量都是连续的, 因而在计算机控制系统中将出现信号变换的采样、量化和保持过程。

(3) 实时控制 计算机的计算过程要与控制过程相适应, 即计算过程要与外部世界的时间相协调, 因此计算机一般都配有实时时钟, 计算机必须在一个采样周期内完成一个控制步骤的计算量, 而下一个控制步骤的计算必须在下一个采样周期内完成。表现在控制程序上, 是递推的差分方程。

(4) 综合控制 计算机是控制系统的控制中心, 可以充分发挥其软件功能与分时的本领, 以实现多变量、多回路、多对象、多工况、变参数和自适应的综合控制。

图 1-1 为一个典型的闭环实时计算机控制系统的原理图。

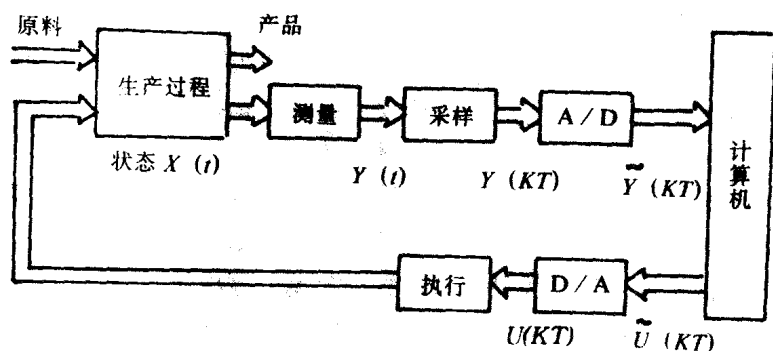


图 1-1

表示过程的状态变量 $X(t)$ ，由测量装置测出其可直接获取的部分——输出变量 $Y(t)$ 。它通常是连续的模拟量，经过一个多路采样器，变为离散的模拟量 $Y(KT)$ （采样）。再由模数转换器 A/D 进行编码。于是信号又变为离散的数字量 $\hat{y}(KT)$ （量化），该信息进入数字计算机，并按照某种控制算法进行计算，得出所需的控制规律 $\hat{u}(KT)$ 。再经数模转换器 D/A 和执行机构，最后又变成连续的模拟信号（保持）施于被控过程。这样就构成了一个闭环的计算机控制系统。图 1-2 表示一个过程

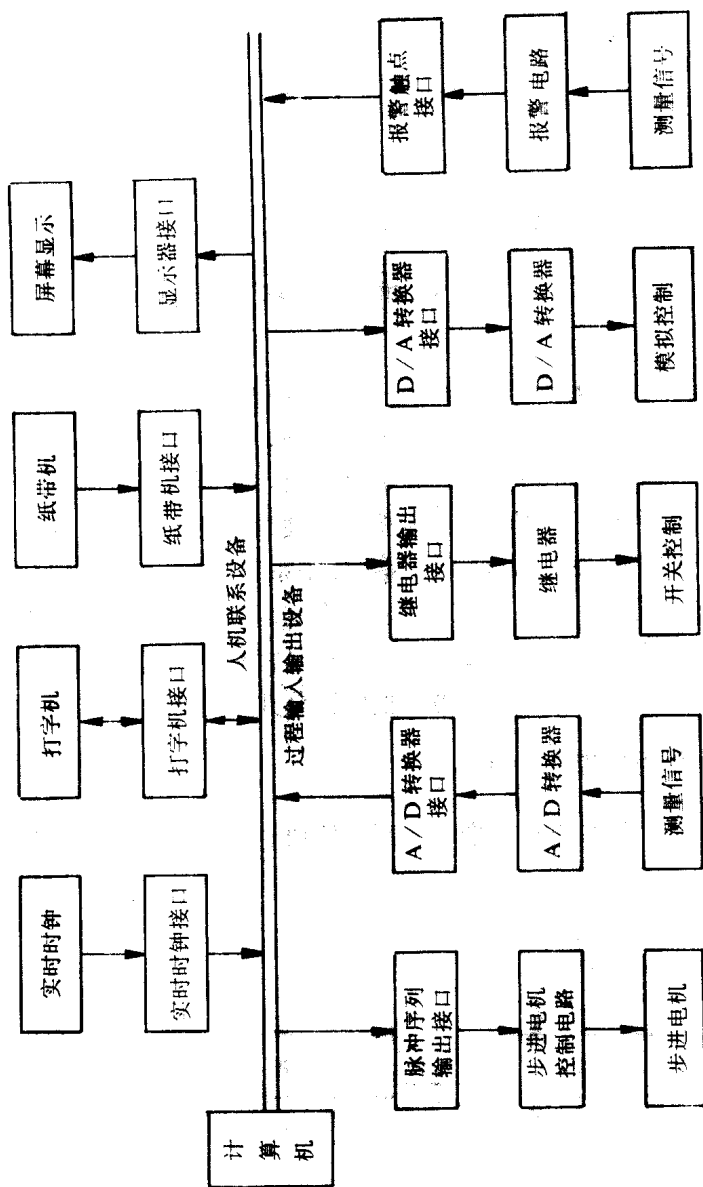


图 1-2

控制的典型配置，它由主机、人机联系设备、过程输入输出设备组成。后两者和外存贮器统称外围设备，它们通过接口连入 I/O 总线。

第二节 计算机控制系统的 硬设备与软设备

这里所说的硬设备与软设备，是指控制机的硬设备与软设备。由主机、外围设备构成了控制机的硬设备，而作为软设备的程序，则分为系统软件及应用软件两类。下面简要地论述一下那些在过程控制中配置在控制机中的硬设备与软设备，指出其特点与功能的关系，为设计计算机控制系统提供一定的依据。需要说明的是，尽管从分类上来看，有些部分是属于一些局部的问题，但由于它们的重要性，我们还是将其中与过程控制密切相关的部分，与一些包含着它们的部分并列起来加以讨论。

一、中央处理机 (CPU)

中央处理机具有运算器和控制器的功能，是计算机的核心部件。它的结构框图如图 1-3 所示。

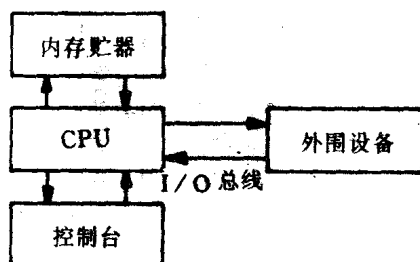


图 1-3

它的主要功能是：

(1) 通过指令地址寄存器跟踪指示指令序列的当前位置。

(2) 由内存贮器取出指令，加以执行，并根据执行结果决定下一步执行哪一条指令。

(3) 负责内存贮器与外围设备之间的数据传输。在现代计算机中，可由“数据通道”把输入输出设备与内存贮器联结起来，CPU 只对这些传输发出指示。

自 1971 年以来，出现了一代崭新的计算机——微型计算机，它以大规模集成电路构成的中央处理机——微处理器为核心，配以半导体存贮器和各种小型外部设备，用于数据处理和过程控制。从原理上讲，微型计算机当然不是什么新东西，但它却有着与一般过程计算机不同的特点。两者相比，微型计算机最主要的特点是：价格相当便宜，适用于迄今只用于模拟或一般数字电路的场合；处理范围小，可将微型机用于小范围控制，需要时，也可将多台微型机组成多处理机系统；标准组件结构，可对不同用户组成专用硬件。

为了完成各种操作，中央处理机内设有若干个寄存器。目前趋向于采用通用寄存器，这有助于程序设计人员编制出更有效的程序，并缩短机器的执行时间。例如，NOVA 计算机有 4 个通用寄存器，PDP-11 有 8~16 个，Z-80 有两组（6 个主寄存器及 6 个辅助寄存器），可交换寄存器组的内容：

$$EXX \quad ; \quad \begin{bmatrix} B, & C \\ D, & E \\ H, & L \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} B', & C' \\ D', & E' \\ H', & L' \end{bmatrix}$$

使一些操作在 CPU 内快速完成，从而减少了 CPU 与内存打交道的次数。以处理中断为例，8080 响应中断时，需将 CPU 寄存器的内容逐个字地推入堆栈，中断结束后，又要把堆栈中的有关数据一个个地弹到 CPU 中，而 Z-80 在处理单级中断时，只

要交换两组寄存器的内容就行了，它的辅助寄存器能暂存 2~8 个字节数据，因此有人把它看作 CPU 的内部堆栈。

在中央处理机的控制线路设计中，已由组合逻辑控制发展到微程序控制。使用微程序控制，不但使机器的设计与修改变得容易，而且便于机器性能的扩充，甚至能模仿其它机器的性能。在软硬件结合中实现机器的宏指令以及故障检测等方面，使用微程序控制更有其独到之处。它利用普通程序设计思想，把每一条机器指令执行的过程分解成一些基本的微操作。而指示执行这些操作的命令称作微指令，每条微指令均以二进制代码形式存放在只读存贮器内。该只读存贮器称为控制存贮器。把微指令按一定的次序设计成微程序，机器执行一条指令的过程，实际上就是执行相应的微程序的过程。而执行微指令的过程，便是从控制存贮器中读出微指令，然后进行相应的微操作，并决定下一步执行哪一个微指令的过程。

二、存贮

计算机采用磁芯型存贮器和半导体存贮器。微型计算机所用的半导体存贮器主要有两种：随机存取存贮器（RAM）和只读存贮器（ROM）。RAM 分为静态和动态两种。静态 RAM 是靠双稳态电路来存贮信息的，多用于小容量存贮器中。动态 RAM 存贮单元的信息是靠 MOS 管的栅极电容上的电荷保存的，电容上的电荷大约只能保持若干毫秒，因此，为了维持存贮的信息，每隔 1 或 2 毫秒就必须对动态 RAM 刷新一次。动态 RAM 要比静态 RAM 的存贮密度高，且价格也比较便宜，故适用于中等容量和大容量的存贮器。

半导体 RAM 和磁芯 RAM 相比较，有一个很大问题是信息的挥发性。即当外部电源停电时，半导体 RAM 的信息在几个毫秒以后就消失了，这在某些应用的场合下是不允许的。在磁

芯存贮器中, 存贮信息依赖于剩磁极性, 只要没有驱动电流, 剩磁是不会消失的。因此在停电以后, 信息仍然能够保持。

在控制机中, 广泛使用只读存贮器 (ROM)。在该器件内, 信息是以永久的形式存入的。一些标准算法, 通用子程序都可以通过只读存贮器来提供。在微型机中, 由于 EPROM (可抹去或可程序的只读存贮器) 的出现, 使用户自行编制程序, 并用编程设备存入 EPROM 内。

存贮容量的估算取决于信息量和计算量。应该考虑到数据的处理、控制程序、辅助程序、诊断程序和管理程序等方面, 最好用假地址试编出整个程序, 并做到留有余地。

三、外围设备

属于外围设备的有纸带机、电传打字机、x-y 记录仪、宽行打印机、屏幕显示器、控制台等等 (统称人-机联系设备); 磁带、磁鼓、磁盘 (统称外存贮器); 过程输入输出通道等。这里, 特别将与过程控制紧密相关的过程输入输出通道单独列出一项来加以讨论, 并接着介绍过程通道的接口。

四、过程通道

过程通道是控制机与被控对象相互交换信息的重要部分, 它可分为输入与输出两大部件。这里主要是指模拟量输入输出通道, 如图 1-4 所示。

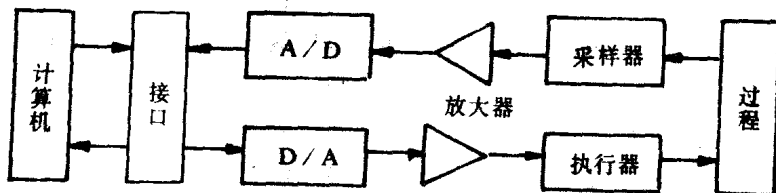


图 1-4

1. 输入通道

现将输入通道中每一器件的功能简述如下：

(1) 多路采样器 多路采样器实际上是一个多点开关，利用它把已变换成统一电压信号的输出变量按程序的要求（顺序扫描或任意扫描）接入放大器的输入端。开关电路可以采用场效应晶体管，其转换速度可达 10 000 点/秒，对于低电平信号，可用干簧或湿簧继电器，转换速度约为 200 点/秒。

(2) 放大器 放大器的功能是把信号加以放大，使之与 A/D 转换器相匹配。对放大器的要求是很高的：高共模抑制比、宽频带、高精度及高稳定度、高输入阻抗及低输出阻抗、低噪声等等。

(3) A/D 转换器 用 A/D 转换器把模拟信号转化为数字信号，一般分为逐次逼近式及积分式两种。前者的转换速度较高，但抗干扰能力较差；而后者则刚好相反。A/D 转换器的分辨能力与位数 n 的关系由下式给出：

$$\text{分辨率} = \frac{1}{2^n - 1} \quad (1-1)$$

例如，当 $n = 11$ 时，可以得到 0.05% 的分辨率。

除了模拟输入通道外，对于来自过程的数字代码、脉冲量、开关量等，可通过专门的数字通道送入主机。

2. 输出通道

对于输出通道，给被控过程输出数据通常采用下列三种方法：

(1) 用 D/A 转换器把一个数字量转化为一个模拟量。

(2) 用脉冲发生器产生由计算机所规定的脉冲个数，脉冲发生器的输出通常用来驱动步进电机。

(3) 用输出开关量作为对外电路接通或断开的控制信号。

在使用微型计算机的系统中，A/D 与 D/A 通常已由大规模集成电路制成。图 1-5a 表示一个单元 D/A 转换器。它由参考