第一章

绪　论

现代化工业生产过程系统规模日益扩大，系统复杂性迅速提高，控制系统由简单回路向多回路耦合、综合自动化发展，控制难度加大。且随着社会的进步，人们要求进一步提高产品质量、提高生产效率、降低能耗、减少污染、减轻劳动强度、提高可靠性，因而对生产过程自动控制水平提出了更高的要求。

电子计算机自本世纪 40年代产生以来，经过几十年的发展，已具有十分强大的功能和很高的可靠性，被广泛应用于人类社会的各个领域。特别是随着微处理器的出现、计算机网络技术的发展、计算机外围设备的进步及控制理论研究的深入，使得计算机应用于生产过程控制的硬件、软件日臻成熟，用以计算机为主的新型控制系统代替常规模拟仪表控制系统已成为控制系统发展的必然趋势。

与常规控制系统（模拟仪表系统）相比，计算机控制系统具有以下特点：

（1）运算精度高。计算机使用数字运算，避免了模拟系统中元器件老化、特性漂移对运算精度的影响，使运行人员更加准确地了解生产过程的运行状况。

（2）控制性能好。计算机控制系统中除使用常规控制方法如 PID 进行控制外，还可方便地使用先进的控制算法改善控制性能。如使用 Smith 预估算法克服控制对象的大迟延、使用自整定调节器来弥补对象时变对控制性能的影响、使用鲁棒控制器提高控制系统的抗干扰能力等。另外，由于计算机控制系统中使用软件模块代替常规模拟控制仪表，使得整个系统接线简单，修改容易，便于构成复杂控制系统。

（3）操作界面友好。计算机控制系统除可方便实现常规指示、记录、声光报警之外，还具有各种直观显示方式，如总貌显示、参数一览显示、流程图显示、趋势显示、报警显示，甚至操作指导、故障诊断等，协助运行人员分析生产过程现状，有利于提高控制水平与事故处理能力。

（4）管控一体化。计算机网络技术的发展，使得多个计算机协同工作，可将设备（回路）控制、车间（机组）控制与全厂管理有机地结合在一起，实现控制与管理系统的信息共享，从而达到整体优化的目的。

（5）可靠性高。采用高质量的电子元器件、合理的电路制作工艺、有效的抗干扰措施、先进的软件编程技术是提高计算机控制系统可靠性的基础。另外，计算机控制系统的冗余、容错设计，使得当出现局部软、硬件故障时不影响系统的正常控制；计算机控制系统的分布式设计，使得当个别回路故障时不影响其他回路；计算机控制系统的自诊断技术，使得系统能及时发现故障，并提前采取措施。所有这些，都为计算机控制系统的长期稳定运行提供了保证。

第一节　计算机控制系统的结构及组成

一、计算机控制系统基本结构

典型的控制系统结构如图 1-1所示。它是由被控对象、测量变送器、控制器和执行器构成的输出反馈控制系统。当图中控制器由模拟仪表实现时，称为连续控制系统；当控制器由计算机实现时，则称为计算机控制系统。由于计算机内部使用数字量进行数据的存储、运算与处理，而生产过程输入输出多为连续模拟信号，因此，计算机控制系统中首先要解决计算机与生产过程间的信号转换问题。实现这一功能的器件是多路开关、采样保持器、模数转换器、数模转换器和保持器，控制器则由计算机实现。典型的输出反馈计算机控制系统结构如图 1-2所示。

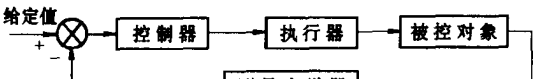


图 1-1　典型的输出反馈控制系统

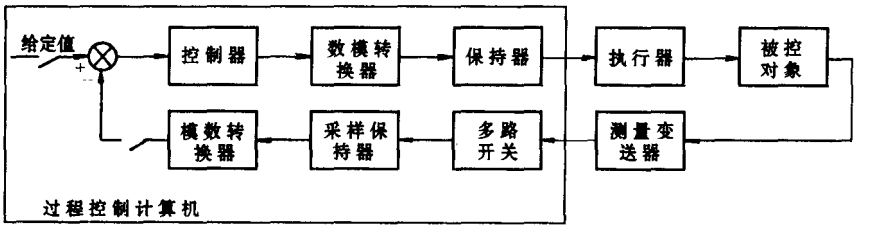


图 1-2　输出反馈计算机控制系统

输出反馈控制是状态反馈控制的特例。计算机的使用使实现状态反馈控制成为可能，从而为现代控制理论应用于生产过程控制创造了条件。状态反馈计算机控制系统的典型结构如图 1-3所示。

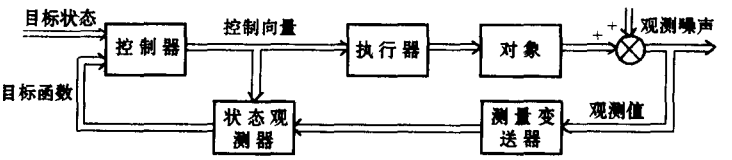


图 1-3　状态反馈计算机控制系统

计算机控制系统的主要组成部分说明如下：

(一)被控对象

被控对象是指所要控制的装置或设备，如风机、水泵、阀门及锅炉、汽轮机、发电机等。在控制系统分析与设计中，被控对象以数学模型形式来描述，其一般形式为微分方程。当然，对于复杂系统，其完整准确的数学模型是难以获得的，工程上往往使用经过简化的、能满足控制要求的近似模型。当考虑被控对象参数在工作点附近波动时，可以假设被控对象具有线性输入输出关系，而以传递函数来表征，这也是目前使用最广泛的对象特性描述方法。

被控对象的传递函数可以归纳为以下几类：

1. 放大环节

$$G(s) = K$$

此类对象如线性阀门、杠杆系统等。

2. 惯性环节

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)\cdots(1 + T_n s)} \quad n = 1,2,\cdots$$

当 $T_1 = T_2 = \cdots = T_m$ 时，有

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T s)^n} \quad n = 1,2,\cdots$$

此类对象一般伴有物质、能量的传递过程，如沿管道的加热过程等。

3. 积分环节

$$G(s) = \frac{K}{T_i S^n} \quad n = 1,2,\cdots$$

此类对象如水箱水位系统等。

4. 纯滞后环节

$$G(s) = e^{-\tau s}$$

此类对象反映物质流动或化学反应造成的纯滞后。

实际对象可能是放大环节、惯性环节、积分环节与纯滞后环节的串联。如喷水减温系统过热器出口温度对减温水调节阀开度的传递函数为惯性环节与纯滞后环节的串联，可表示为

$$G(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)\cdots(1 + T_n s)} e^{-\tau s}$$

汽包水位对给水量的传递函数为积分环节与纯滞后环节的串联，可表示为

$$G(s) = \frac{K}{T_i s^n} e^{-\tau s}$$

被控对象也可以按照输入、输出量的个数分类。当仅有一个输入 $U(s)$ 和一个输出 $Y(s)$ 时，称为单输入单输出对象，这是最简单的情况。当对象具有多个输入和单个输出时，称为多输入单输出对象。当对象具有多个输入和多个输出时，称为多输入多输出对象，这是最普遍的情况。

对于锅炉汽轮机系统，在一定条件下可以简化为二输入二输出系统，如图 1-4 所示。其中 μ_B 为进入锅炉的热量，μ_T 为汽轮机调门开度，N 为实发功率，P 为机前压力。该图说明锅炉汽轮机系统为耦合系统，μ_B 既通过 $G_{11}(s)$ 影响 P，又通过 $G_{12}(s)$ 影响 N；μ_T 既通过 $G_{22}(s)$ 影响 N，又通过 $G_{21}(s)$ 影响 P。设计上述对象的控制系统时，要用到多变量解耦理论与方法。

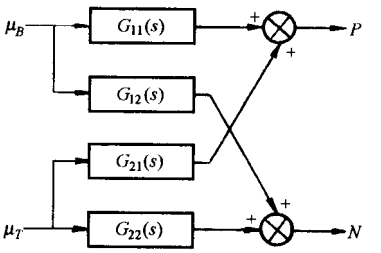


图 1-4　机炉控制对象

掌握被控对象特性对调节器参数整定十分有用。关于被控对象特性的求取、分析及应用请参阅有关资料，此处不作详述。

（二）执行器

执行器是控制系统中的重要部件，它根据控制器输出的控制信号，通过调节机构改变被调介质的流量或能量，使生产过程符合预定的要求。按照采用的动力方式，执行器可以分为电动执行器、气动执行器和液动执行器三大类。

执行器通常由执行机构和调节阀两部分组成，调节阀的特性有线性特性、等百分比特性和快开特性等三种，如图 1-5 所示。

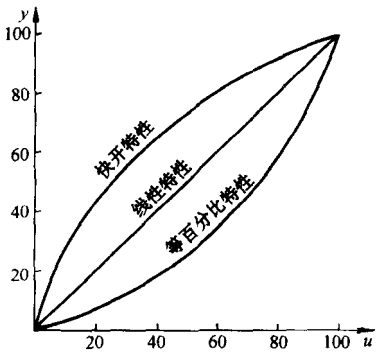


图 1-5 调节阀的输入输出特性

执行器性能的好坏对控制系统控制效果将产生重要影响。因此，使用前要对其进行调校，以减少死区、增加可调范围、缩小回差。控制系统设计时还要加入阀门特性非线性补偿环节。

（三）测量变送器

测量变送器由传感器和测量线路组成，它将过程参数转换为某种形式的信号，以便于传输、显示或计算。生产过程中常用的测量变送器有测量温度的热电偶、热电阻，测量压力的压力变送器，测量流量的差压变送器及液位传感器、力传感器、应变传感器、振动传感器、火焰探测器等。在计算机控制系统中，首先要将过程参数通过测量变送器转换为电信号，再经过隔离、调理及模数转换后变成数字量进入计算机，本书第二章将对其作详细描述。

（四）控制器

数字控制器的核心为数字计算机，数字控制器的控制规律是由计算机程序来实现的。由于计算机程序编写的灵活性，使得数字控制器比传统模拟控制器能实现更强大的功能。关于数字控制器的控制规律及实现算法将在以后章节作详细描述。

二、过程控制计算机组成

应用于生产过程控制的计算机系统，除具有一般计算机系统的基本结构之外，必不可少的还有计算机与生产过程的接口。另外，为适应生产现场特有的恶劣环境，如干扰、高温、腐蚀、粉尘、振动等，以及为满足工业生产连续运行需要，过程控制计算机比商用或家用计算机要有更高的可靠性。第六章将就如何提高计算机控制系统的可靠性作详细描述。

过程控制计算机由硬件与软件两大部分组成。

（一）过程控制计算机硬件组成

过程控制计算机硬件主要由主机、外部设备、过程通道、人机接口设备和通信设备等组成，如图 1-6 所示。现分别说明如下：

1. 主机

主机由中央处理器（CPU）和内存储器（RAM、ROM）组成，是计算机系统的核心。系统运行时，主机首先将程序从外部存储器（磁盘）调入内存储器，然后在 CPU 控制下逐条执行。当调入内存的程序为用户编写的生产过程控制程序时，那么该系统将完成数据采集、控制运算、控制输出等一系列任务。

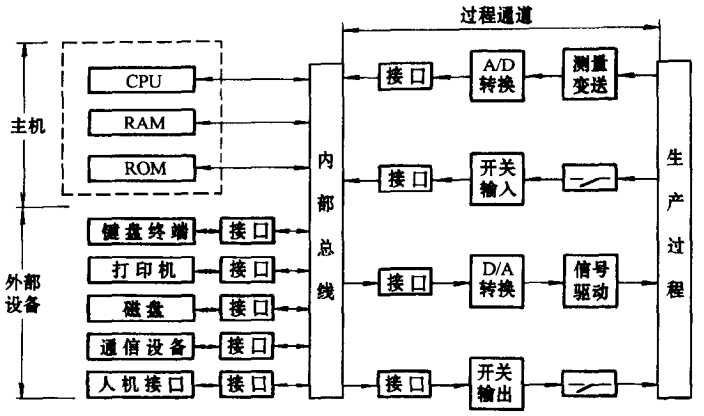


图 1-6　过程控制计算机硬件组成

2. 外部设备

外部设备也称外围设备。常用的外部设备有输入设备（键盘、鼠标等）、输出设备（CRT 打印机等）及外存储器（软盘、硬盘、光盘等）。外部设备作为计算机系统的标准配置，能够满足一般数据输入输出与管理的基本要求。随着计算机技术的发展，不断有新的设备出现，如声音输入、图像输入、触摸屏、大屏幕等，这些新设备为计算机的应用提供了更好的条件。

3. 过程通道

过程控制计算机与通用计算机的重要区别是其具有与生产过程的接口，称之为过程通道。常见的过程通道有：模拟量输入通道（简称 AI 通道）、开关量输入通道（简称 DI 通道）、模拟量输出通道（简称 AO通道）、开关量输出通道（简称 DO 通道）。

4. 人机接口设备

运行维护人员通过人机接口设备了解和干预生产过程。对运行人员来说，要及时掌握生产设备及流程的运行现状，必要时进行相应的操作；对系统维护工程师来说，要负责控制系统的管理与维护，根据需要还可对控制系统、控制策略及参数进行修改。前者一般由操作员接口（操作员站）完成，后者一般通过工程师接口（工程师站）完成。

5. 通信设备

复杂生产过程的控制与管理，仅由单台计算机是难以胜任的，往往需要多台计算机的协同工作。每个计算机完成不同的功能，在地理上也可能是分散的。它们之间的信息交换要通过通信设备或计算机网络来实现。关于计算机通信网络的内容将在第四章介绍。

（二）过程控制计算机软件

软件是各种程序的总称。计算机硬件只有配备相应的软件后才能完成特定的功能。计算机软件通常分为系统软件与应用软件两大类。

系统软件是用来使用和管理计算机本身以及为应用软件提供开发环境的程序。如操作系统、数据库系统、计算机语言编译程序等。

应用软件是用户针对具体应用对象而编制的程序。如过程控制计算机中的数据采集与

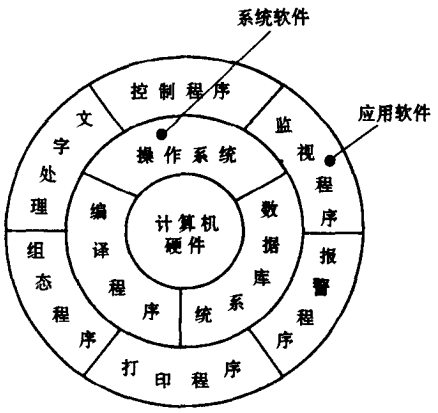


图 1-7　计算机软件系统

处理程序、控制算法程序、报警处理程序等。

系统软件、应用软件与计算机硬件的关系如图1-7所示。

（三）过程控制计算机系统的主要性能指标

衡量过程控制计算机系统性能的主要指标有：

（1）主机。字长，主频，内存容量等。目前CPU字长有8位、16位、32位及64位等。

（2）外部设备。外存容量，CRT尺寸及分辨率，打印机类型等。

（3）通信性能。通信速率，联网能力，网络可靠性等。

（4）过程接口。转换精度，转换速率，隔离性能等。

（6）软件。实时性，方便性，可靠性等。

（5）系统可靠性。抗干扰能力，可用率等。

过程控制计算机的应用形式是很广泛的，从简单的显示仪表、单回路控制器到大型的融控制、管理于一身的计算机网络，不同应用场合对计算机系统的要求是有很大差别的。选择计算机系统要从实际应用出发，使性能价格比达到最优。

第二节　计算机控制系统的类型

按照功能与结构的不同，计算机控制系统可以划分为数据采集与处理系统、直接数字控制系统、监督计算机控制系统及集散控制系统几大类。

一、数据采集与处理系统（DAS）

任何一个计算机控制系统都离不开数据的采集与处理。数据采集与处理系统对生产过程参数作巡回检测、处理、分析、记录以及参数越限报警。同时，通过对大量参数的统计和分析，可以更好地掌握生产过程的运行状况及各参数的变化趋势，并在必要时给出操作指导。数据采集与处理系统结构如图1-8所示。

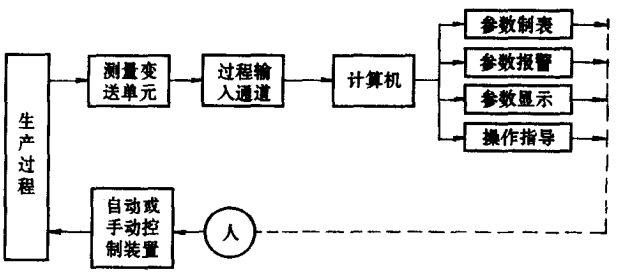


图 1-8　数据采集与处理系统

二、直接数字控制系统（DDC）

直接数字控制系统与模拟控制系统相似，只不过是以计算机代替模拟调节器来实现控制功能。计算机根据测得的参数，按照一定的控制规律进行计算，运算结果经过过程输出通道输出并作用到被控对象。计算机的使用，除能够实现PID调节规律之外，还能实现复杂控制规律。直接数字控制系统结构

如图 1-9 所示。

三、监督控制系统（SCC）

监督控制系统结构如图 1-10 所示。监督计算机根据生产过程工艺参数和数学模型给出工艺参数的最佳值，作为模拟或数字调节器的给定值。监督控制的效果取决于数学模型的精确程度。

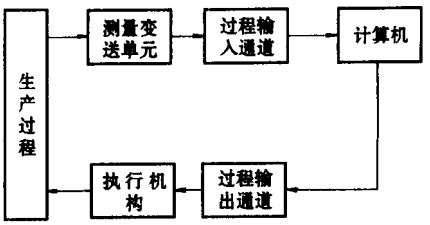


图 1-9 直接数字控制系统

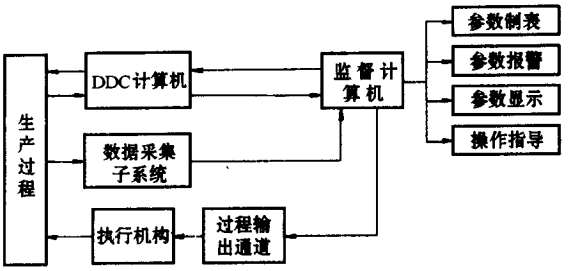


图 1-10 监督控制系统

在有的系统中，计算机在执行监督控制的同时，也兼有 DDC 功能。

监督控制可以提高系统的可靠性，当监督控制级发生故障时， DDC 计算机独立完成操作，当 DDC计算机发生故障时，监督控制级可以代替前者执行控制任务。

四、集散控制系统 （DCS）

集散控制系统也称为分布式计算机控制系统，它是以微处理机为核心，以控制技术、通信技术和 CRT（Cathode－Ray Tube）显示技术为基础的新型计算机控制系统。集散控制系统结构如图 1-11 所示。

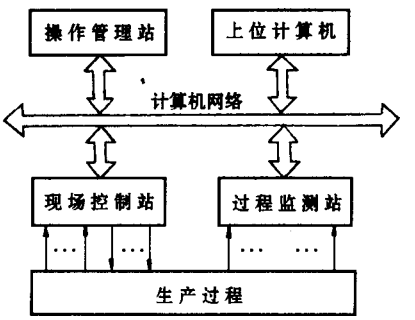


图 1-11 集散控制系统

集散控制系统将多台带有微处理器的现场控制站或过程监测站分散在生产现场，各自实现不同的测量和控制任务，从而具有功能分散和地理分散的特点，避免了 DDC 系统中测量、控制高度集中带来的危险性和常规仪表控制功能单一的局限性；数据通信技术和显示技术的发展使 DCS 能够方便地实现集中操作、显示和报警。

集散控制系统能够完成直接数字控制、顺序控制、批量控制、数据采集和处理以及高级控制策略。近年来，集散控制系统中还包含了生产指挥、调度和管理的功能。集散控制系统是当前计算机在火电厂控制领域应用最广的一种形式。

第三节 计算机控制系统在火电厂的应用概况及发展展望

一、计算机控制的发展及其在火电厂中的应用概况

（一）计算机控制的发展概况

计算机在生产过程中的应用，可以归纳为以下几个阶段：

(1) 开创阶段。20世纪 50 年代末至 60年代初。1959 年世界上第一台过程控制计算机 TRW - 300 在美国 Port Arthur炼油厂投入运行。该计算机系统能够控制 26 个流量、72 个温度、3 个压力和 3个成份。

早期的计算机采用电子管，运算速度慢、体积大、可靠性差，主要用于数据处理和操作指导。

(2) 小型计算机阶段。20世纪 60年代后期，随着集成电路技术的发展，使得计算机运算速度加快，体积减小，价格下降，可靠性提高，出现了专用于工业生产过程控制的小型机，如 PDP - 11 等。

(3) 微型计算机阶段。20世纪 70 年代初，随着大规模集成电路技术的发展，出现了微型计算机，使得计算机在生产过程中的应用开始普及，并从传统的集中控制系统发展为集散控制系统。

(4) 集散控制系统阶段。20 世纪 80 年代以后，计算机的控制功能更加分散，基本控制器控制回路数减少，可靠性进一步提高，并朝着智能化、综合化方向发展。

2. 过程控制计算机在火电厂中的应用概况

计算机在火电机组上的应用是从数据采集与处理开始的，逐渐出现了 DDC ；随着微处理器的出现，以微处理器为核心的数字调节仪表得到了推广使用，如数字组装仪表、单回路调节器、可编程控制器等。近年来，大型火电机组热工控制系统广泛使用了集散控制系 统(DCS)。采 用 DCS 的单元机组主控系统如图 1-12所示。

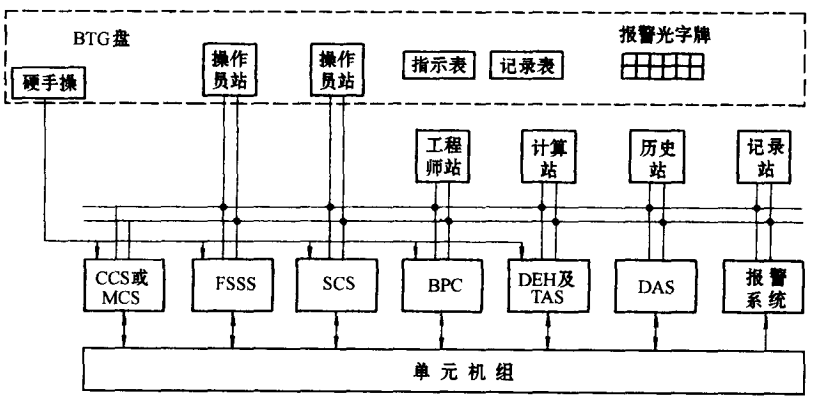


图 1-12 采用 DCS的单元机组主控系统

大型火电单元机组热工自动化主要着重于控制、报警、监测与保护四个方面。为满足这四个方面的功能，一般大型单元机组的过程计算机控制都包括下列主要功能系统：数据采集系统（DAS—Data Acquisition System），机炉协调控制系统（CCS—Coordinated Control System)，顺序控制系统（SCS—Sequence Control System)，锅炉炉膛安全监视系统（FSSS—Furnace Safeguard Supervisory System)，汽机旁路控制系统（BPC—Bypass Control System)，汽机电液控制系统（DEH—Digital Electric Hydraulic Control System ）等。

二、过程控制计算机在火电厂的应用展望

计算机控制技术的发展是日新月异的，新理论、新方法、新技术的应用正在改变着火

电厂传统的控制、操作与管理模式。

（1）电气控制将纳入 DCS，使机、炉、电作为一个整体进行控制。

（2）采用大屏幕显示器，减轻运行人员长期监视 CRT 造成的视觉疲劳，并为实现一人监盘提供新的技术措施。

（3）FCS 的应用。FCS 是现场总线控制系统（ Fieldbus Control System）的简称。现场总线为智能化现场仪表（如智能变送器等）与计算机系统的数字通信链路。使用现场总线，可以节约大量电缆，提高控制信号传输的准确性和可靠性，简化系统的设计、安装、调试和维护等。

（4）机组自动控制水平进一步提高，运行维护更加简单，出现驾驶仓式控制室。驾驶仓式控制室的含义为：物理上控制室小型化；功能上控制中心进一步智能化、自动化。主要表现在：①机组成千上万个信息应尽可能浓缩后提供给运行操作人员；②对机组实行全程控制；③有完善的事故处理能力。

（5）智能控制应用。针对机组对象具有非线性、大时滞、变结构和无精确模型的特点，将更多地使用智能控制的方法。主要有：①模糊控制，从行为上模拟人的模糊推理和决策过程；②分级递阶智能控制，模拟人脑的分层结构，由执行级、协调级和组织级构成控制系统；③专家控制，将人的感性经验（浅层知识）和定理算法（深层知识）相结合；④神经网络控制，从机理上对人脑生理系统进行简单结构模拟的一种新兴控制和辨识方法；⑤拟人智能控制，模拟、延伸和扩展人的多层次智能即人控制器的控制方法；⑥预测控制，利用模型预测被控对象未来的输出，以此进行超前控制。

（6）管控一体化。DCS 或 FCS 与 SIS（监控信息系统）、MIS （管理信息系统）互相渗透、彼此结合，形成一个多层次、网络化，融控制、管理、调度和决策于一体的综合自动化系统。

第二章

过 程 通 道

过程通道是过程控制计算机与被控对象间进行信息传递的通道。过程参数（压力、温度、流量、成分、位移等）及设备状态（启停、开关等）要以适当的形式输入到计算机中，而计算机运算处理结果或控制作用还要返回到被控对象以影响系统的运行。根据生产过程能够产生与接受的信号种类，过程通道可分为模拟量输入通道（AI）、开关量输入通道（DI）、模拟量输出通道（AO）及开关量输出通道（DO）。

本章首先介绍过程参数采样原理，它是设计、选择过程通道的基础，然后分别讨论各种过程通道的构成原理及接口技术。

第一节 过程参数采样原理

一、信号的采样

1. 采样过程

计算机控制系统中，被控对象的运行参数是模拟量，在时间上是连续的，而计算机能处理的是数字量，在时间上是离散的。把这两种不同的量组织在一个系统中，必须通过信号转换。图 2-1 给出计算机控制系统的信号流图。一个连续的模拟信号，经过采样器和模／数转换器（A/D），就变成离散的数字信号了，这个信号就能够被计算机所接受。经计算机处理后，输出一个离散的数字信号去控制被控对象。这时，要经过数/模转换器（D/A）和保持器，以把离散的数字信号变为连续的模拟信号。

图中主要有四种信号：模拟信号一时间上连续，幅值上也连续的信号，如 $y(t)$；离散模拟信号一时间上离散，幅值上连续的信号，如 $y^*(t)$；数字信号一时间上离散、幅值

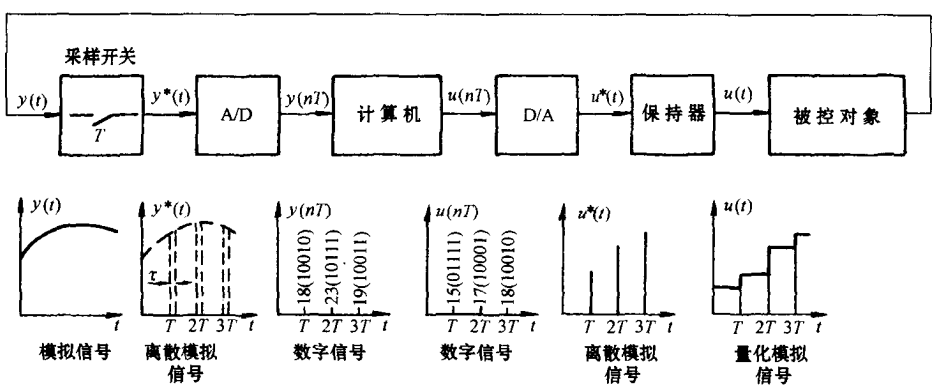


图 2-1 计算机控制系统信号流图

上离散的信号，如 $y(nT)$ 和 $u(nT)$；量化模拟信号一时间上连续、幅值上连续量化的信号，但当采样周期 T 足够小时，可以认为是连续的模拟信号，如 $u(t)$。

将模拟信号变换为离散信号的过程称为采样过程，实现采样的装置称为采样器或采样开关。采样器输入 $y(t)$ 称为原信号，采样器输出 $y^*(t)$ 称为采样信号。

采样信号为一脉冲序列，在采样期间（采样开关闭合），采样信号与原信号相同，在其余时间内（采样开关断开），采样信号为零。一般说来，采样开关按一定时间间隔 T 重复接通与断开动作，称 T 为采样周期。采样信号可以描述为

$$y^*(t) = p(t)y(t) \tag{2-1}$$

其中 $p(t)$ 是幅值为 1，周期为 T，宽度为 τ 的脉冲序列，如图 2-2（b）所示。当 $\tau \ll T$ 时（实际情况），可以认为

$$p(t) \approx \delta_T(t) \tag{2-2}$$

这里 $\delta_T(t)$ 为单位脉冲序列，如图 2-2（d）所示

$$\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$$

其中 $\delta(t)$ 为单位脉冲函数

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & (t = 0) \\ 0 & (t \neq 0) \end{cases}$$

将式（2-2）代入式（2-1），得

$$y^*(t) = y(t)\delta_T(t) = y(t)\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$$

或

$$y^*(t) = y(t)\delta_T(t) = y(t)\sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)\delta(t - kT)$$

式（2-3）表明，当采样开关的闭合时间 τ 远小于采样周期时，可以近似认为 $y*(t)$ 是 $y(t)$ 在采样开关闭合时的瞬时值。图 2-2给出了采样过程。

在计算机控制系统中，采样周期 T 的选择是极其重要的。显然，采样周期越小，采样结果越接近连续变化的信号，但同时使计算机用在数据采集及处理上的时间就越长，硬

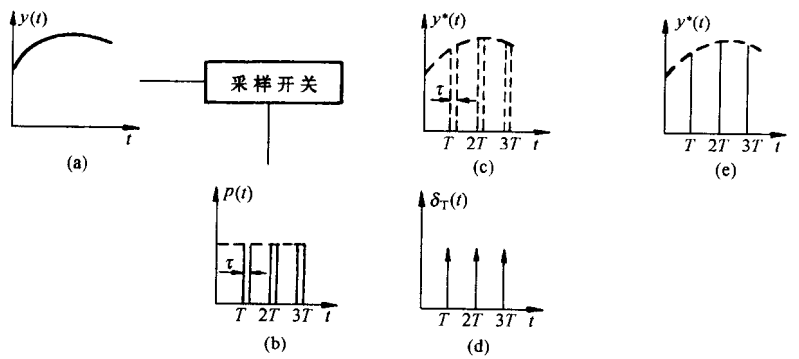


图 2-2 采样过程

（a）模拟信号；（b）脉冲序列；（c）采样信号；（d）单位脉冲序列；（e）理想采样信号

件投资也要相应增加；采样周期太大，将会出现采样信号不能代表原信号的现象，因而也不可能达到很好的控制效果。

选择采样周期的理论依据是采样定理，它给出了从采样信号 $y^*(t)$ 唯一地复现原信号 $y(t)$ 所必须的最低采样频率。

2. 采样定理

采样定理可以描述为：设原始信号频谱的最高频率为 ω_{max}，采样频率为 ω_s，则当

$$\omega_s \geqslant 2\omega_{max} \text{ 或 } T < \pi/\omega_{max} \tag{2-4}$$

即采样频率大于等于原始信号频谱中最高频率的两倍时，才能根据采样信号 $y^*(t)$ 唯一地复现原信号 $y(t)$。

采样定理的理解可以通过对原始信号 $y(t)$ 与采样信号 $y^*(t)$ 的频率特性分析来进行。假设 $y(t)$ 的频率特性为 $Y(\omega)$，则 $y^*(t)$ 的频率特性为

$$Y^*(\omega) = \frac{1}{T}\sum_{k=-\infty}^{\infty} Y[j(\omega + k\omega_s)] \tag{2-5}$$

$$\omega_s = 2\pi/T$$

式中 ω_s——采样角频率。

通常，连续信号频谱的带宽是有限的，如图 2-3（a）所示，上限频率为 ω_{max}。而离散信号 $y^*(t)$ 的频谱则是以 ω_s 为周期的无限多个频谱，如图 2-3（b）、（c）所示。

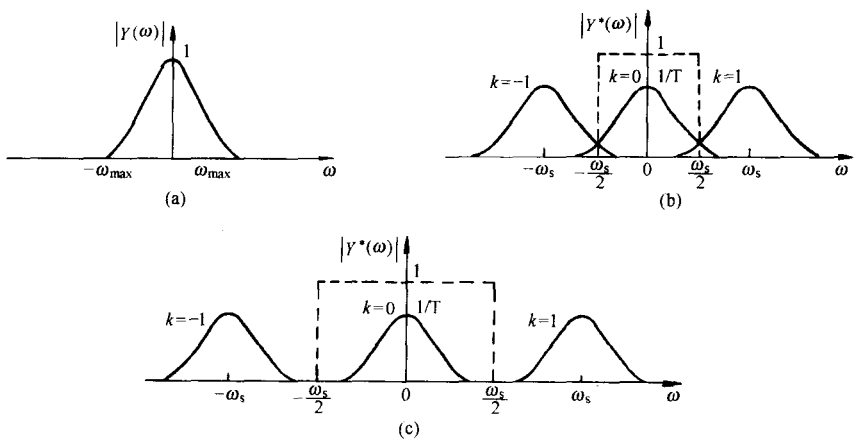


图 2-3 信号频谱

（a）连续信号频谱；（b）有重叠的离散信号频谱；（c）无重叠的离散信号频谱

当 $\omega_s > 2\omega_{max}$ 时，离散信号 $y^*(t)$ 的频谱 $|Y^*(\omega)|$ 是由无限多个孤立频谱组成的离散频谱，其中 $k=0$ 对应的便是 $y(t)$ 的频谱，只是幅值为原来的 $1/T$，其他 $|k| \geqslant 1$ 对应的各项频谱，都是由于采样而产生的高频频谱。由图 2-3（b）可以看出，当 $\omega_s \geqslant 2\omega_{max}$ 时，相邻的频谱就不会重叠。如果把采样后的离散信号加到图中虚线所示的理想低通滤波器上，在滤波器的输出端得到的频谱将准确地等于 $y(t)$ 频谱 $|Y(\omega)|$ 的 $1/T$ 倍。经过放大器放大 T 倍，便可以从 $y^*(t)$ 不失真地恢复原始信号 $y(t)$。

随着 ω_s 的降低，相邻间的频谱将会靠近，当 $\omega_s < 2\omega_{max}$ 时，相邻的频谱将会出现重叠，如图 2-3（c），$y^*(t)$ 在 $k=0$ 的离散频谱与 $y(t)$ 的连续频谱之间产生了畸变。此时，即使仍用理想的低通滤波器，$y^*(t)$ 经滤波后也恢复不了原始信号 $y(t)$，即信号也产生了畸变。

二、信号的保持

计算机输出的数字信号经数模转换器（D/A）转换为离散信号，由于离散信号只在采样时刻有输出值，其余时刻为零，因此不能直接控制连续对象。信号的保持是按照一定的方法来确定两次采样之间信号的幅值。能够把离散信号 $u^*(t)$ 转换为模拟信号 $u(t)$ 的装置称为保持器。

保持器的工作原理是根据现在时刻或过去时刻的采样值 $u(kT)$，$u[(k-1)T]$ …用外推法去逼近两个采样时刻之间的原信号 $u(kT+\Delta t)$，其中 $0 \leqslant \Delta t < T$。外推公式的一般形式为

$$u(kT+\Delta t) = a_0 + a_1\Delta t + a_2\Delta t^2 + \cdots + a_m\Delta t^m \tag{2-6}$$

式（2-6）称为 m 阶外推公式，代表的是 m 阶保持器，其中 a_i 为待定值，$i=0, \cdots, m$。

当 $m=0$ 时，得零阶保持器的外推公式

$$u(kT+\Delta t) = u(kT) \qquad 0 \leqslant \Delta t < T$$

零阶保持器是把 kT 时刻的信号一直保持（外推）到 $(k+1)T$ 时刻前的瞬间，如图 2-4（a）所示。

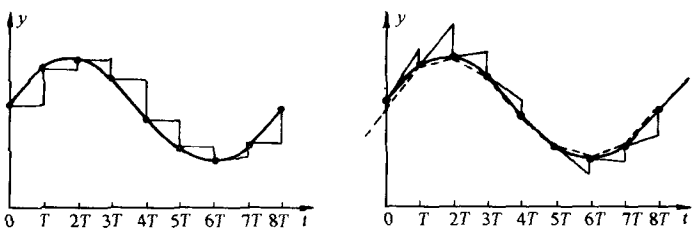


图 2-4 信号的保持

（a）零阶保持器；（b）一阶保持器

当 $m=1$ 时，得一阶保持器的外推公式

$$u(kT+\Delta t) = u(kT) + \Delta t[u(kt) - u(kT-T)]/T \qquad 0 \leqslant \Delta t < T$$

一阶保持器是利用 kT 和 $(k-1)T$ 时刻的值作直线外推，斜率为 $[u(kt) - u(kT-T)]/T$，如图 2-4（b）所示。

在计算机控制系统中，数模转换器（D/A）具有零阶保持器的功能。

三、实际系统中采样周期的选择

采样定理为我们选取采样周期奠定了理论基础，它所给出的是不产生重叠现象的最大采样周期，即给出了采样周期的上限。但实际上，连续信号的最高频率是很难确定的。因为它往往包含了各种噪声。其次，采样理论要求所有的采样值取得后，才能确定被采样的时间函数 $y(t)$，这对于连续运行的计算机控制系统来说也难以办到，因为在实际系统中，

后面的采样动作发生之前，计算机就要对生产过程进行控制了。

从对调节品质的要求来看，希望采样周期取得小些，以达到较好的控制效果。采样周期愈小，就不会失去信号的主要特征，就愈接近连续控制。

从执行元件的动作要求来看，有时需要输出信号保持一定的宽度，例如，通过 D/A 转换推动步进电机时，输出信号通过保持器达到所要求的幅度需要一定的时间，在这段时间内要求计算机输出不应变化。因此采样周期又必须大于这一时间，否则执行元件就不能按预定的调节规律动作。

从控制系统随动和抗干扰的性能要求来看，则要求采样周期短些，这样可使输入信号得到迅速反应，不致在随动系统中产生大的延时。

从计算机的工作量来看，则又希望采样周期大些，特别是在多回路控制中，必须保证每个回路的控制算法有足够的时间完成。在这种情况下，要充分发挥计算机软件的优点，对不同回路分别选用不同的采样周期，不必强求最小的采样周期。

由以上分析可见，采样周期受各方面因素的影响，有些是互相矛盾的，必须视具体情况作出折中的选择。

工业过程控制中，一般的控制对象都具有低通的性质，图 2-5提供了在此类控制中采样周期的经验选择方法，表 2-1 列出了采样周期的参考值。

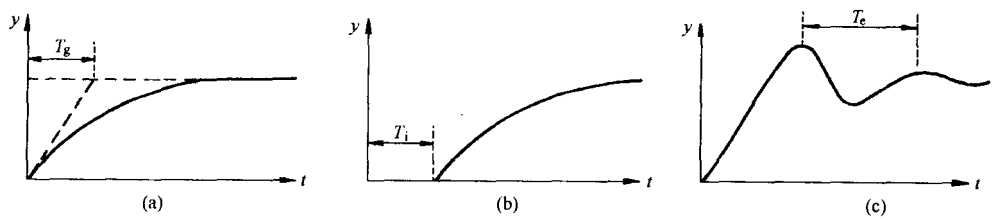


图 2-5　采样周期的选择

(a) 单容过程取 $T \leqslant 0.1T_g$；(b) 滞后过程取 $T \leqslant 0.1T_i$；(c) 振荡过程取 $T \leqslant 0.1T_c$

表 2-1　　采样周期参考值

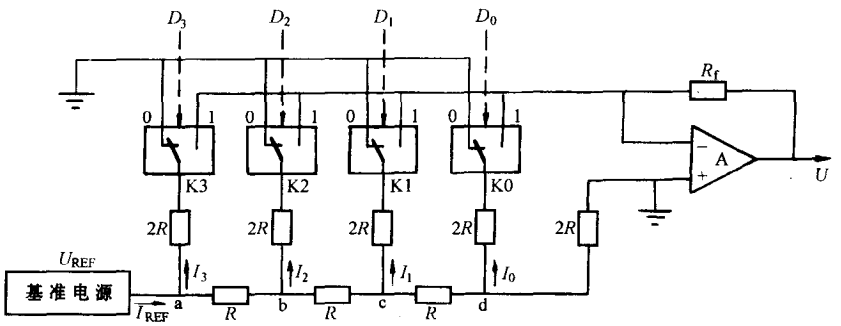
物理量	采样周期 (s)	备　注	物理量	采样周期 (s)	备　注
流　量	1 ~ 5	优先选用 1 ~ 2s	温　度	15 ~ 20	
压　力	3 ~ 10	优先选用 6 ~ 8s	成　分	15 ~ 20	
液　位	6 ~ 8				

第二节　模拟量输出通道

模拟量输出通道的任务是把计算机输出的数字量转换成模拟电压或电流信号，以便去驱动相应的执行机构，达到控制的目的。模拟量输出通道由数／模转换器（DAC 或 D/A：Digital to Analog Converter）及辅助电路构成。

一、D/A 转换器原理

数／模转换器(D/A）是将输入的数字量转换为模拟量的器件，它是模拟量输出通道的核心。D/A转换器按其与计算机的接口方式可分为并行 D/A转换器与串行 D/A 转换器。图 2-6所示为 4 位并行 D/A转换器的原理框图，它主要由四部分组成，即基准电源 U_{REF}、R-$2R$权电阻网络、位切换开关 K0～K3 和运算放大器 A。其工作原理为：



位切换开关 K0～K3 分别受输入数字量 $D_0 \sim D_3$ 的控制，当 D_i 为 0 时，Ki 接地端；当 D_i 为 1时，Ki 接放大器负端（虚地）。所以不管 Ki 切换到什么位置，所有 $2R$ 支路上端的电位均相同（地电位）。因此，各 $2R$ 支路下端 a、b、c、d诸点的电压是按 1/2系数进行分配的，相应各支路的电流也是按 1/2 系数进行分配。即有

$$U_a = U_{REF}, U_b = U_a/2, U_c = U_b/2, U_d = U_c/2$$

$$I_3 = I_{REF}/2, I_2 = I_{REF}/(2 \times 2) = I_{REF}/4, I_1 = I_{REF}/(2 \times 2 \times 2)$$
$$= I_{REF}/8, I_0 = I_{REF}/(2 \times 2 \times 2 \times 2) = I_{REF}/16$$

故有

$$U = -(D_3/2 + D_2/4 + D_1/8 + D_0/16) I_{REF} R_f$$

当 $D_0 \sim D_3$ 为 1111 即满度时，K0～K3 都接放大器的负端，此时有

$$U = -(1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16) I_{REF} R_f = -15/16 I_{REF} R_f = -15/16 U_{REF} R_f/R$$

同理，对 n 位数／模转换器而言，其输出电压

$$U = -(D_{n-1}2^{-1} + D_{n-2}2^{-2} + \cdots + D_0 2^{-n}) I_{REF} R_f$$
$$= -(D_{n-1}2^{-1} + D_{n-2}2^{-2} + \cdots + D_0 2^{-n}) U_{REF} R_f/R$$

二、D/A转换器芯片

现在，D/A 转换电路已经集成在一块芯片上了，一般用户没有必要了解其内部电路的细节，只要掌握芯片的外部特征和使用方法就够了。根据 D/A 芯片所接受的数字量位数，一般有 8位、10 位、12 位、16位等，在选用 D/A 时，用户要根据使用场合进行选择。

为了帮助理解 D/A 芯片及其与计算机的接口方法，我们以 DAC0832 为例作一简单说明，其他芯片及其计算机接口请读者查找有关资料。

图 2-7 是 8 位 D/A 转换器芯片 DAC0832 内部原理框图。由于有两个分别控制的数据寄

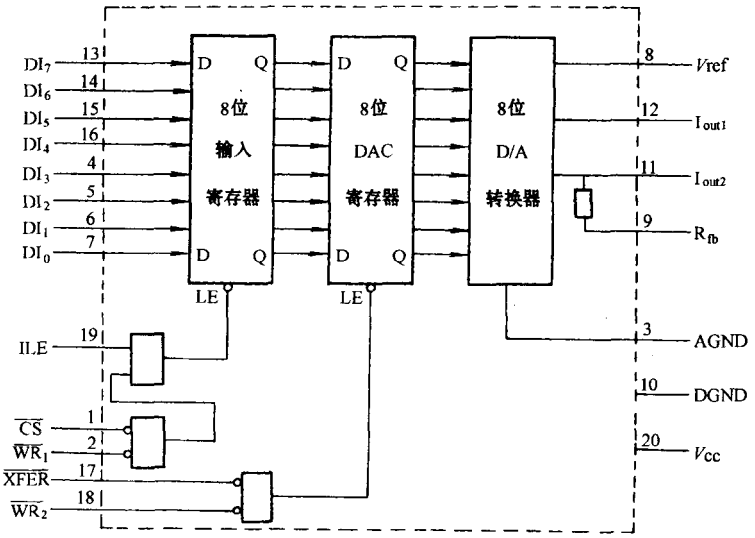


图 2-7　DAC0832原理框图及引脚

存器，使用时可根据需要接成不同的输入工作方式，具有较大的灵活性。外部采用 20 脚双立直插式封装，各引脚功能如下。

$DI_0 \sim DI_7$：数据输入线，其中 DI_0 为最低有效位 LSB，DI_7 为最高有效位 MSB。

CS：片选信号，输入线，低电平有效。

WR_1：写信号 1，输入线，低电平有效。

ILE：允许输入锁存线，输入线，高电平有效。

当 ILE、$\overline{CS}$和 $\overline{WR_1}$同时有效时，8位输入寄存器 LE端为高电平“ 1”，此时寄存器的输出端 Q跟随输入端 D的电平变化；反之，当 LE端为低电平“ 0”时，原 D端输入数据被锁存于 Q端，而且在此期间 D端电平的变化不影响 Q端。

WR_2 写信号，输入线，低电平有效。

XFER：传送控制信号，输入线，低电平有效。

当$\overline{WR_2}$和$\overline{XFER}$为同时有效时，8位 DAC寄存器 LE端为高电平“ 1”,此时将第一级 8位输入寄存器 Q端的状态锁存到第二级 8位 DAC 寄存器中，以便 D/A 转换。

通常把 CPU的写信号$\overline{WR}$作为 $\overline{WR_1}$、$\overline{WR_2}$的信号，把接口地址译码信号作为 $\overline{CS}$。如无特殊要求可将 ILE接高电位，XFER接地。

一般情况下把$\overline{WR_2}$和 XFER接地，置成单级工作方式，以便简化电路。特殊情况下可采用双级工作方式，例如要求多个 D/A转换器同步工作时，首先将 D/A转换数据逐个置入 8位输入寄存器，然后用统一信号（$\overline{WR_2}$和$\overline{XFER}$）再置入 8位 DAC 寄存器，以便实现多个 D/A 转换器同步输出。

I_{out1}：DAC 电流输出端 1，此输出一般作为运算放大器差动输入信号之一。

I_{out2}：DAC电流输出端 2，此输出一般作为运算放大器另一个差动输入信号。

R_{fb}：该电阻可用作外部运算放大器的反馈电阻，接于运算放大器的输入端。

V_{REF} 基准电压源端，输入线，－10VDC～＋10VDC。

V_{cc}：工作电压源端，输入线，＋5VDC～＋10VDC。

DGND：数字电路地线。

AGND：模拟电路地线。

三、模拟量输出电路构成

一个完整的模拟量输出通道除了必需的 D/A 转换器之外，还要有一系列外围电路与之配合。模拟量输出通道一般是由接口电路、数模转换器（D/A)和电压／电流转换器（V/I）等组成。图 2-8 所示为一路模拟量输出通道构成示意图。数据锁存寄存器一方面将 CPU 来的需要转换的数字量保存起来，另一方面还起到总线缓冲作用。控制电路用来协调整个电路的动作，如数据锁存、启动 D/A 转换等。在有些 D/A 芯片中，已经集成了数据缓冲锁存器（如 DAC0832），这时上述电路中的数据缓冲锁存器就可以省略。

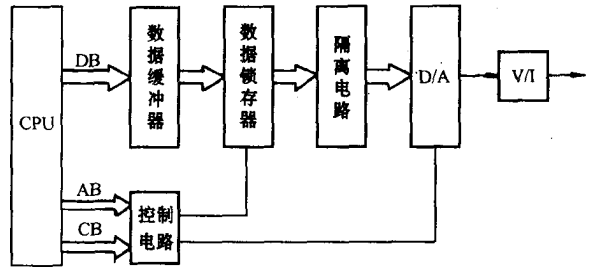


图 2-8 模拟量输出通道示意图

隔离电路是为了将计算机系统与现场实现电气隔离，避免现场干扰信号影响计算机系统的正常运行。模拟量输出通道中最简单常用的隔离方法是采用光电耦合器。

使用 ADC0832 构成的 D/A 转换电路如图 2-9 所示。其中 74LS138 为译码器，它将 CPU 输出的地址信号（A_0～A_2）转换为译码器的有效输出 $\overline{Y}_0$～$\overline{Y}_7$，从而控制 ADC0832 启动转换。74LS138 的真值表如表 2-2 所示，它有三个选择输入端，可组合成 8 种输入状态，分别与 8 个输出端之一相对应，输出端为低电平有效。三个控制端 E、$\overline{EA}$、$\overline{EB}$必须同时为有效电平即 100 时，才选通译码器，否则译码器输出无效。

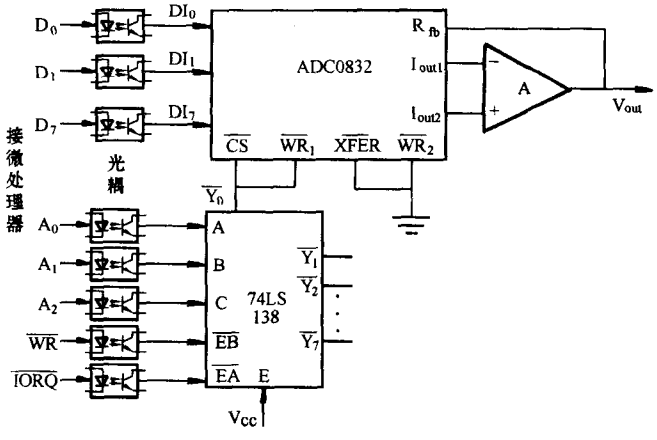


图 2-9 用 DAC0832 构成的模拟量输出通道