

# 第 1 章

## 计算机控制系统概述

### 本章知识点：

- 计算机控制系统的特征
- 计算机控制系统的工作原理
- 计算机控制系统的硬件组成
- 计算机控制系统的典型结构

### 基本要求：

- 了解计算机控制系统的发展过程、特点、任务和目标
- 掌握计算机控制系统的组成、分类及性能指标

### 能力培养：

通过计算机控制系统的发展过程、特点、任务、目标、组成、分类及性能指标等知识点的学习，能够明确计算机控制系统的学习目的、内容与要求，初步建立控制系统的概念体系。

计算机控制是自动控制发展中的高级阶段，是自动控制的重要分支，广泛应用于工业、国防和民用等各个领域。随着计算机技术、高级控制策略、检测与传感技术、现场总线、通信与网络技术的高速发展，计算机控制系统已从简单的单机控制系统发展到了今天的集散控制系统、综合自动化系统等。

本章主要介绍计算机控制系统的基本特征、组成、分类和主要发展趋势。

## 1.1 计算机控制系统的特征与组成



计算机控制系统的组成

从模拟控制系统发展到计算机控制系统，控制器结构、控制器中的信号形式、系统的过程通道内容、控制量的产生方法、控制系统的组成观念均发生了重大变化。计算机控制系统在系统结构方面有自己独特的内容；在功能配置方面呈现出模拟控制系统无可比拟的优势；在工作过程与方式等方面存在其必须遵循的规则。

### 1.1.1 计算机控制系统的特征与工作原理

将连续控制系统中的模拟控制器的功能用计算机来实现，就组成了一个典型的计算机控制系统，如图 1-1 所示。

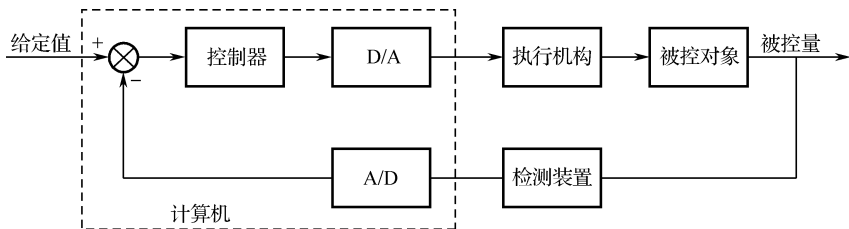


图 1-1 计算机控制系统的典型结构

计算机控制系统由两个基本部分组成，即硬件和软件系统。硬件指计算机本身及其外部设备。软件是指计算机的程序及生产过程应用程序。只有软件和硬件有机地结合，计算机控制系统才能正常运行。

### 1. 结构特征

模拟控制系统中均采用模拟器件，而对于计算机控制系统中的核心部件计算机来说，其能够接收和处理的量均为数字量，所以计算机控制系统是模拟和数字部件的混合系统。

模拟控制系统的控制器由运算放大器等模拟器件构成，控制规律越复杂，所需要的硬件也越多、越复杂，模拟硬件的成本几乎和控制规律复杂程度成正比，并且若要修改控制规律，一般必须改变硬件结构。在计算机控制系统中，控制规律由软件实现，修改一个控制规律，无论简单还是复杂，只需修改软件，一般不需对硬件结构进行改变，因此便于实现复杂的控制规律和对控制方案进行在线修改，使系统具有很大的灵活性和适应性。

在模拟控制系统中，一般是一个控制器控制一个回路，而在计算机控制系统中，由于计算机具有高速的运算处理能力，可以采用分时控制的方式，同时控制多个回路。

### 2. 信号特征

模拟控制系统中各处的信号均为连续的模拟信号，而计算机控制系统中除仍有连续模拟信号外，还有离散模拟、离散数字等多种信号形式，计算机控制系统的信号流程如图 1-2 所示。

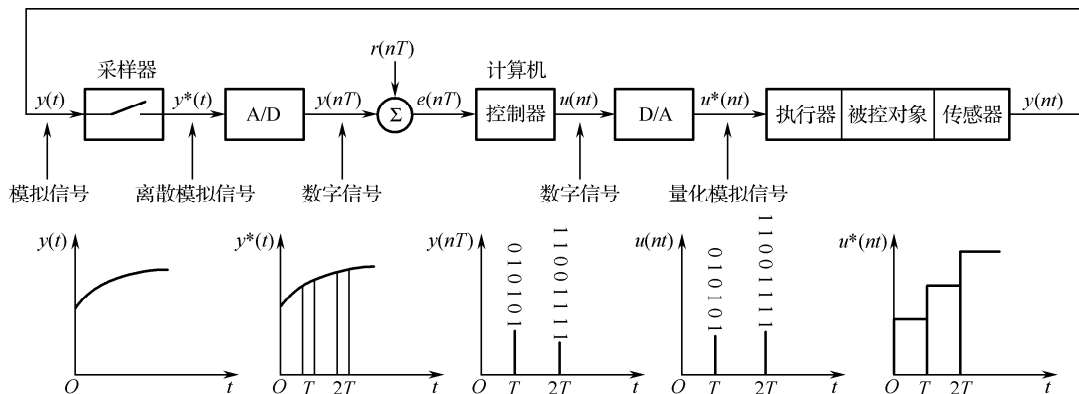


图 1-2 计算机控制系统的信号流程

在控制系统中引入计算机，利用计算机的运算、逻辑判断和记忆等功能完成多种控制任务。由于计算机只能处理数字信号，为了信号的匹配，在计算机的输入和输出中必须配置 A/D（模/数转换器）和 D/A（数/模转换器）。反馈量经过 A/D 转换为数字量以后，才能输入计算机。计算机根据期望值与实际值间的偏差，利用某种控制规律（如 PID 控制）进行运算，计算结果（数

字信号)再经 A/D 转换器,将数字信号转换为模拟信号输出到执行结构,完成对被控对象的控制。

按照计算机控制系统中信号的传输方向,系统的信息通道由 3 部分组成:

(1) 过程输入通道,包含由 A/D 转换器组成的模拟量输入通道和开关量输入通道。

(2) 过程输出通道,包含由 D/A 转换器组成的模拟量输出通道和开关量输出通道。

(3) 人机交互通道,系统操作者通过人机交互通道向计算机控制系统发布相关命令,提供操作参数,修改设置内容等,计算机则可通过人机交互通道向系统操作者显示相关参数、系统工作状态、控制效果等。

计算机通过输出过程通道向被控对象或工业现场提供控制量,通过输入过程通道获取被控对象或工业现场信息,当计算机控制系统没有输入过程通道时,称之为计算机开环控制系统。在计算机开环控制系统中,计算机的输出只随给定值变化,不受被控参数的影响,通过调整给定值达到调整被控参数的目的。但当被控对象出现扰动时,计算机无法自动获得扰动信息,因此无法消除扰动,导致控制性能较差。当计算机控制系统仅有输入过程通道时,称之为计算机数据采集系统。在计算机数据采集系统中,计算机作用是对采集来的数据进行处理、归类、分析、储存、显示与打印等,而计算机的输出与系统的输入通道参数输出有关,但不影响或改变生产过程的参数,所以这样的系统可认为是开环系统,但不是开环控制系统。

### 3. 控制方法特征

由于计算机控制系统除了包含连续信号外,还包含数字信号,从而使计算机控制系统与连续控制系统在本质上有许多不同,需采用专门的理论来分析和设计。常用的设计方法有两种,即模拟设计法和直接设计法。

### 4. 功能特征

与模拟控制系统比较,计算机控制系统的重要功能特征表现为:

#### 1) 以软件代替硬件

以软件代替硬件的功能主要体现在两方面,一方面是当被控对象改变时,计算机及其相应的过程通道硬件只需做少量的变化,甚至不需做任何变化,面向新对象重新设计一套新控制软件即可;另一方面是可以用软件来替代逻辑部件的功能实现,从而降低系统成本,减小设备体积。

#### 2) 数据存储

计算机具备多种数据保持方式,如脱机保持方式有 U 盘、移动硬盘、光盘、纸质打印、纸质绘图等;联机保持方式有固定硬盘、EEPROM 等,工作特点是系统断电不会丢失数据。正是由于有了这些数据保护措施,使得人们在研究计算机控制系统时可以从容应对突发问题;在分析解决问题时可以大量减少盲目性,从而提高了系统的研发效率,缩短研发周期。

#### 3) 状态、数据显示

计算机具有强大的显示功能。显示设备类型有 CRT 显示器、LED 数码管、LED 矩阵块、LCD 显示器、LCD 模块、各种类型打印机、各种类型绘图仪等;显示模式包括数字、字母、符号、图形、图像、虚拟设备面板等;显示方式有静态、动态、二维、三维等;显示内容涵盖给定值、当前值、历史值、修改值、系统工作波形、系统工作轨迹仿真图等。人们通过显示内容可以及时了解系统的工作状态、被控对象的变化情况、控制算法的控制效果等。

#### 4) 管理功能

计算机都具有串行通信或联网功能，利用这些功能可实现多个计算机控制系统的联网管理、资源共享、优势互补；可构成分级分布集散控制系统，以满足生产规模不断扩大，生产工艺日趋复杂，可靠性要求更高，灵活性希望更好，操作需更简易的大系统综合控制的要求；实现生产过程（状态）的最优化与生产规划、组织、决策、管理（静态）的最优化的有机结合。

### 1.1.2 计算机控制系统的工作原理

计算机控制系统的典型结构框图如图 1-3 所示。可以看出，在计算机控制系统中，计算机根据给定输入信号、反馈信号与系统的数学模型进行信号处理，实现控制策略，通过执行机构控制被控对象，达到预期的控制目标。

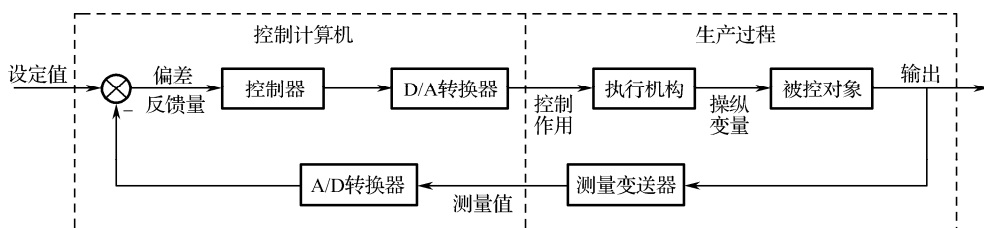


图 1-3 计算机控制系统的典型结构框图

由于生产过程的各种物理量一般都是模拟量，而计算机的输入和输出均采用数字量，因此在计算机控制系统中，对于信号输入，需增加 A/D 转换器，将连续的模拟信号转换成计算机能接收的数字信号；对于输出，需增加 D/A 转换器，将计算机输出的数字信号转换成执行机构所需的连续模拟信号。

#### 1. 计算机控制系统的工作原理

从本质上讲，计算机控制系统的工作过程可归纳为以下 4 个步骤：

- (1) 实时数据采集：对来自测量变送装置的被控量的瞬时值进行检测并输入。
- (2) 实时控制决策：对采集到的被控量进行分析和处理，并按已定的控制规律决定将要采取的控制行为。
- (3) 实时控制输出：根据控制决策适时地对执行机构发出控制信号，完成控制任务。
- (4) 信息管理：随着网络技术和控制策略的发展，信息共享和管理也是计算机控制系统必须完成的功能。

上述过程不断重复，使整个系统按照一定的品质指标进行工作，并对控制量和设备本身的异常现象及时做出处理。

#### 2. 计算机控制系统的工作方式

##### 1) 在线方式和离线方式

在计算机控制系统中，生产过程和计算机直接连接并受计算机控制的方式称为在线方式或联机方式；生产过程不和计算机相连，且不受计算机控制，而是靠人进行联系并做相应操作的方式称为离线方式或脱机方式。

## 2) 实时的含义

所谓实时,是指信号的输入、计算和输出都要在一定的时间内完成,也即计算机对输入信息以足够快的速度进行控制,超出了这个时间,就失去了控制的时机,控制也就失去了意义。实时的概念不能脱离具体过程,一个在线的系统不一定是一个实时系统,但一个实时控制系统必定是在线系统。

下面以一个计算机温度控制系统为例,简要说明计算机控制系统的工作原理,系统组成示意图如图 1-4 所示。

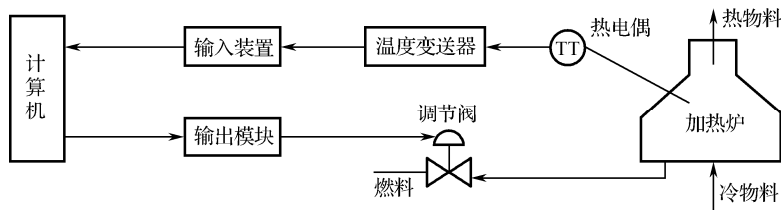


图 1-4 计算机温度控制系统组成示意图

根据工艺要求,该系统要求加热炉的炉温控制在给定的范围内,并且按照一定的时间曲线变化。在计算机显示器上用数字或图形实时地显示温度值。

假设加热炉使用的燃料为重油,并使用调节阀作为执行机构,使用热电偶来测量加热炉内的温度。热电偶把检测信号送入温度变送器,将其转换为标准电压信号(1~5V),再将该电压信号送入输入装置。输入装置可以是一个模块也可以是一块板卡,它将检测得到的信号转换为计算机可以识别的数字信号。计算机中的软件根据数字信号按照一定的控制算法进行计算。计算出来的结果通过输出模块转换为可以推动调节阀动作的电流信号(4~20mA)。通过改变调节阀门开度即可改变燃料流量的大小,从而达到控制加热炉炉温的目的。与此同时,计算机中的软件还可以利用计算机的键盘和鼠标输入炉温的设定值,由此实现计算机监控的目的。



### 1.1.3 计算机控制系统的硬件组成

计算机控制系统的硬件组成框图如图 1-5 所示,由计算机(工控机)和生产过程两大部分组成。

计算机控制系统结构

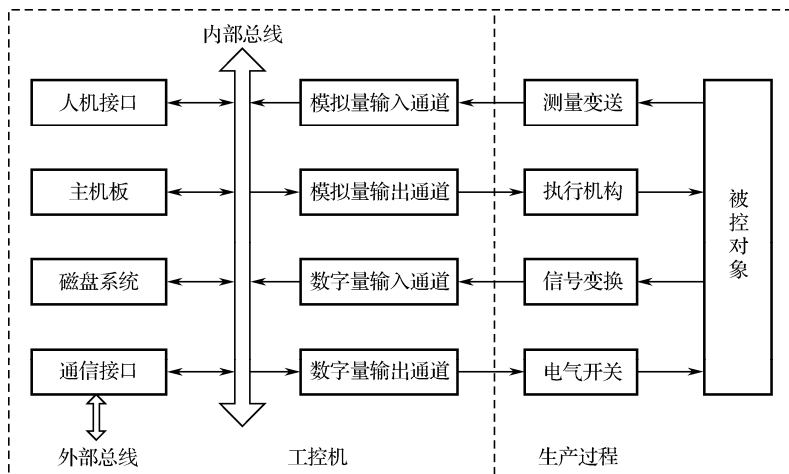


图 1-5 计算机控制系统的硬件组成框图

## 1. 工控机

### 1) 主机板

工业控制机的核心，由中央处理器（CPU）、存储器（RAM、ROM）、监控定时器、电源掉电监测、保存重要数据的后备存储器、实时日历时钟等部件组成。主机板的作用是将采集到的实时信息按照预定程序进行必要的数值计算、逻辑判断、数据处理，及时选择控制策略并将结果输出到工业过程。

### 2) 系统总线

系统总线可分为内部总线和外部总线。内部总线是工控机内部各组成部分之间进行信息传送的公共通道，是一组信号线的集合。常用的内部总线有 IBM PC、PCI、ISA 和 STD 总线。

外部总线是工控机与其他计算机和智能设备进行信息传送的公共通道，常用外部总线有 RS-232C、RS-485 和 IEEE-488 通信总线。

### 3) 输入/输出模板

工控机和生产过程之间进行信号传递和变换的连接通道，包括模拟量输入通道（AI）、模拟量输出通道（AO）、数字量（开关量）输入通道（DI）、数字量（开关量）输出通道（DO）。输入通道的作用是将生产过程的信号变换成主机能够接收和识别的代码，输出通道的作用是将主机输出的控制命令和数据进行变换，作为执行机构或电气开关的控制信号。

### 4) 人机接口

人机接口包括显示器、键盘、打印机及专用操作显示台等。通过人-机接口设备，操作员与计算机之间可以进行信息交换。人-机接口既可以用于显示工业生产过程的状况，也可以用于修改运行参数。

### 5) 通信接口

通信接口是工业控制机与其他计算机和智能设备进行信息传送的通道，常用 IEEE-488、RS-232C 和 RS-485 接口。为方便主机系统集成，USB 总线接口技术正日益受到重视。

### 6) 磁盘系统

可以用半导体虚拟磁盘，也可以配通用的硬磁盘或采用 USB 磁盘。

## 2. 生产过程

生产过程包括被控对象、执行机构等装置，这些装置都有各种类型的标准产品，在设计计算机控制系统时，根据实际需求合理选型即可。

### 1.1.4 计算机控制系统软件

对于计算机控制系统而言，除了硬件组成部分以外，软件也是必不可少的部分。软件是指完成各种功能的计算机程序的总和，如完成操作、监控、管理、计算和自诊断程序等。软件是计算机控制系统的神经中枢，整个系统的动作都是在软件的指挥下进行协调工作的。若按功能分类，可分为系统软件和应用软件两大部分。

系统软件一般是由计算机厂家提供的，用来管理计算机本身的资源，方便用户使用计算机的软件。它主要包括操作系统、各种编译软件、监控管理软件等，这些软件一般不需要用户自

已设计，它们只是作为开发应用软件的工具。

应用软件是面向生产过程的程序，如 A/D、D/A 转换程序及数据采集、数字滤波程序、标度变换程序、控制量计算程序等。应用软件大都由用户自己根据实际需要进行开发。应用软件的优劣，将对控制系统的功能、精度和效率产生很大的影响，它的设计是非常重要的。

## 1.2 计算机控制系统的分类



计算机控制技术应用

计算机控制系统与其所控制的生产对象密切相关，控制对象不同，其控制系统也不同。计算机控制系统的分类方法很多，可以按照系统的功能、工作特点分类，也可按照控制规律、控制方式分类。

按照控制方式分类，可分为开环控制和闭环控制。

按照控制规律分类，可分为程序和顺序控制、比例积分微分控制（PID 控制）、有限拍控制、复杂规律控制、智能控制等。

按照系统的功能、工作特点分类，可为操作指导控制系统、直接数字控制系统、监督计算机控制系统、分布式计算机控制系统和计算机集成制造系统等。

### 1.2.1 操作指导控制系统

操作指导控制（Operation Guide Control, OGC）系统是基于数据采集系统的一种开环结构，其结构如图 1-6 所示。计算机根据采集到的数据及工艺要求进行参数最优化计算，计算机的输出不直接用来控制生产对象，而只是对系统过程参数进行收集、加工处理，然后输出数据。操作人员根据计算机输出的控制量去改变各个控制器的设定值或者操作执行器，来达到操作指导的作用。

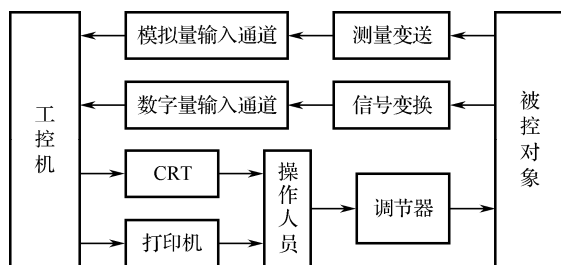


图 1-6 操作指导控制系统结构

操作指导控制系统的优点是：结构简单、控制灵活和安全，特别适用于未摸清控制规律的系统。缺点是：要通过人工的操作，速度受到了一定的限制，不可以同时控制多个回路。因此，该系统经常被用于计算机控制系统设置的初级阶段，或者用于试验新的数学模型、调试新的控制程序等场合。

### 1.2.2 直接数字控制系统

直接数字控制（Direct Digital Control, DDC）系统的结构如图 1-7 所示。计算机通过输入通道对一个或多个物理量进行巡回检测，并根据规定的控制规律进行运算，然后发出控制信号，

通过输出通道直接控制调节阀等执行机构。

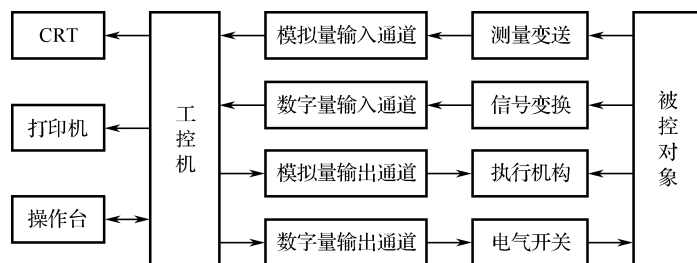


图 1-7 直接数字控制系统结构

DDC 系统属于计算机闭环控制系统，不仅可以完全取代模拟调节器，实现多回路的 PID 控制，而且只要改变程序就可以实现复杂的控制规律，如非线性控制、纯滞后控制、串级控制、前馈控制、最优控制、自适应控制等。DDC 系统是计算机在工业生产过程中最普遍的一种应用方式。

由于 DDC 系统中的计算机直接承担控制任务，所以要求实时性好、可靠性高和适应性强。为了充分发挥计算机的利用率，一台计算机通常要控制几个或几十个回路，这时要合理地设计应用软件，使之不失时机地完成所有功能。

### 1.2.3 监督计算机控制系统

在监督计算机控制（Supervisory Computer Control, SCC）系统中，计算机根据工艺参数和过程参量检测值，按照所设计的控制算法计算出最佳设定值，直接传给常规模拟调节器或 DDC 计算机，最后由模拟调节器或 DDC 计算机控制生产过程。SCC 系统有两种类型，一种是 SCC+模拟调节器，另一种是 SCC+DDC 控制系统。监督计算机控制系统构成示意图如图 1-8 所示。

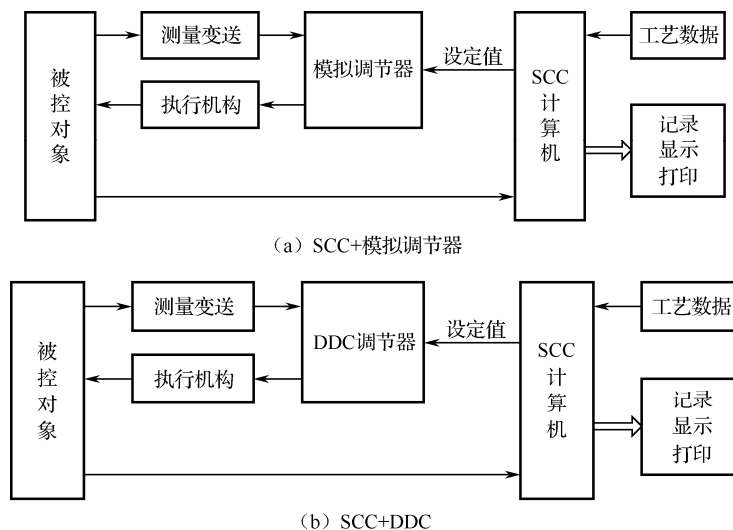


图 1-8 监督计算机控制系统构成示意图

#### 1. SCC+模拟调节器的控制系统

这种类型的系统中，计算机对各过程参数进行巡回检测，并按一定的数学模型对生产工况



进行分析、计算后得出被控对象各参数的最优设定值，送给调节器，使工况保持在最优状态。当 SCC 计算机发生故障时，可由模拟调节器独立执行控制任务。

## 2. SCC+DDC 的控制系统

这是一种二级控制系统，SCC 可采用较高档的计算机，它与 DDC 之间通过接口进行信息交换。SCC 计算机完成工段、车间等高一级的最优化分析和计算，然后给出最优设定值，送给 DDC 计算机执行控制。

通常在 SCC 系统中，选用具有较强计算能力的计算机，其主要任务是输入采样和计算设定值。由于它不参与频繁的输出控制，可有时间进行具有复杂规律的控制算式的计算。因此，SCC 能进行最优控制、自适应控制等，并能完成某些管理工作。SCC 系统的优点是不仅可以进行复杂控制规律的控制，而且其工作可靠性较高，当 SCC 出现故障时，下级仍可以继续执行控制任务。

### 1.2.4 集散控制系统

集散控制系统 (Distributed Control System, DCS) 的结构如图 1-9 所示。它采用分散控制、集中控制、分级管理和综合协调的设计原则与网络化的控制结构，把系统从下到上分成现场级、分散过程控制级、集中操作监控级、综合信息管理级等，每一级都有自己的功能，基本上是独立的，但级与级之间或同级的计算机之间又有一定的联系，相互之间实现通信。



集散控制系统

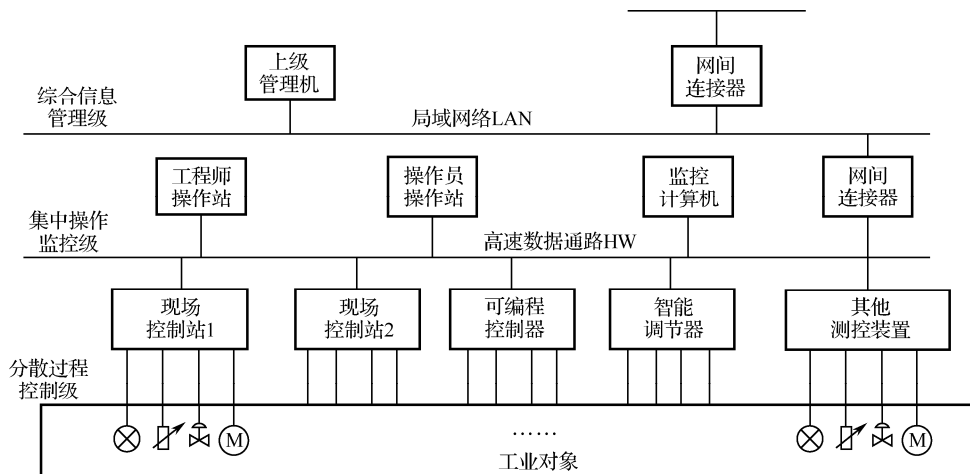


图 1-9 集散控制系统结构图

### 1.2.5 现场总线控制系统

现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS) 是新一代分布式控制系统，它变革了 DCS 直接控制层的控制站和生产现场层的模拟仪表，保留了 DCS 的操作监控层、生产管理层的决策管理层。FCS 从下至上依次分为现场控制层、操作监控层、生产管理层的决策管理层，如图 1-10 所示。其中现场控制层是 FCS 所特有的，另外三层和 DCS 相同。现场总线控制系统的核心是现场总线。

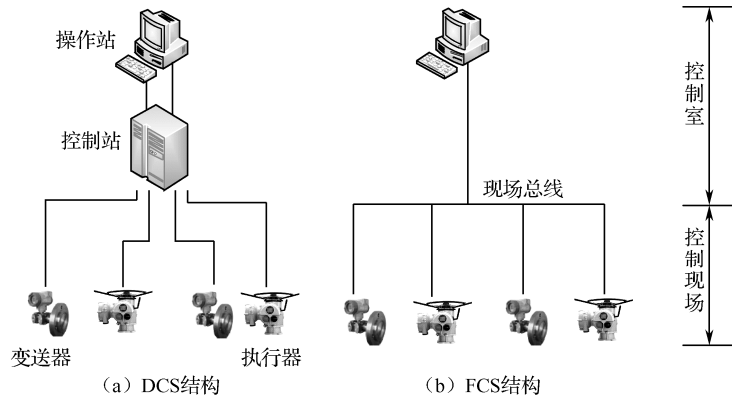


图 1-10 DCS 和 FCS 的结构比较

现场总线控制系统原理框图如图 1-11 所示。

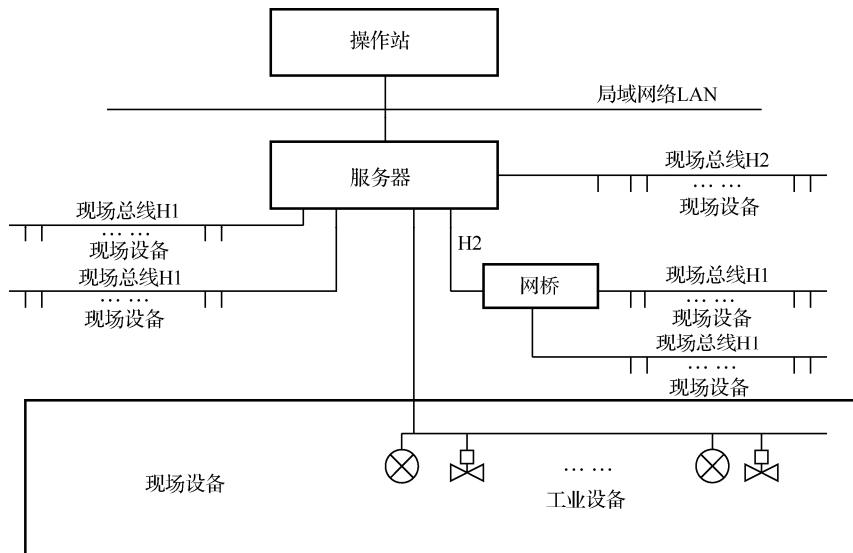


图 1-11 现场总线控制系统原理框图

FCS 的核心是现场总线，它将当今网络通信与管理的概念引入工业控制领域。从本质上说，现场总线是一种数字通信协议，是连接智能现场设备和自动化系统的数字式、双向传输、多分支结构的串行通信网络。

### 1.2.6 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 是计算机技术、网络技术、自动化技术、信号处理技术、管理技术和系统工程技术等新技术发展的结果，它将企业的生产、经营、管理、计划、产品设计、加工制造、销售及服务等环节和人力、财力、设备等生产要素集成起来，进行统一控制，求得生产活动的最优化。CIMS 一般由集成工程设计系统、集成管理信息系统、生产过程实时信息系统、柔性制造工程系统及数据库、通信网络等组成。后来人们将 CIMS 系统集成的思想应用到流程工业中，也获得了良好的设计效果。流程工业与离散工业特征的区别，使得流程工业 CIMS 技术主要体现在决策分析、计划调度、生产监控、质量管理、安全控制等方面，其核心技术难题是生产监控和质量管理等。现在，流程工

业 CIMS 有了一个简单独立的名称 CIPS (Computer Integrated Process System), 也就是计算机集成流程系统。

CIMS 采用多任务分层体系结构, 现在已形成多种方案, 如美国国家标准局的自动化制造实验室提出的 5 层递阶控制体系结构、面向集成平台的 CIMS 体系结构、连续型 CIMS 体系结构及局域网型 CIMS 体系结构等。图 1-12 给出了流程工业 CIMS 的递阶层次结构, 自下而上分为控制层、监控层、调度层、管理层和决策层 5 个层次, 清晰地表征流程工业 CIMS 中各功能层之间的相互定位, 以及各层与模型、功能和应用系统之间的对应关系。

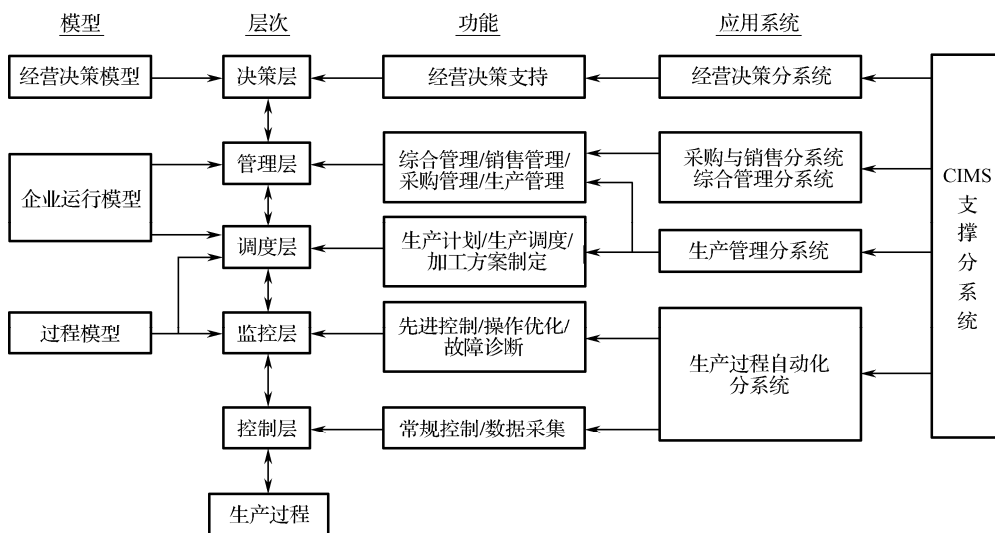


图 1-12 流程工业 CIMS 的递阶层次结构

### 1.2.7 物联网控制系统

物联网控制系统 (Internet of Things Control System, IOT-CS) 是指以物联网为通信媒介, 将控制系统元件进行互联, 使控制相关信息进行安全交互和共享, 达到预控制目标的系统。

在物联网控制系统中, 可以把控制功能分散在不同的智能控制系统元件中完成, 并且采用物联网进行安全通信, 实现各控制部分之间的信息交互和协调工作。单个物联网控制系统单元的工作过程可以归纳为以下主要环节。

(1) 参数采集: 对被控参数在采样时间间隔内进行测量, 并将采样结果通过物联网安全地传送给智能控制器。

(2) 控制决策: 对采集到的被控参数进行分析处理后, 按预先规定的控制规则确定控制策略。

(3) 控制输出: 根据控制决策, 安全地对执行机构发送控制信号, 完成预定任务。

(4) 信息管理: 根据用户需求和厂商决策, 对有用信息进行有效存储和安全共享。

(5) 状态监控: 当授权使用者需要查看当前控制状态时, 控制设备应当能够及时地将当前状态发送给合法授权使用者。

由控制系统的发展历程可以看出, 物联网控制系统要想实现其控制目标, 至少要包括如下部分, 即施控部分、被控部分、控制环节和反馈环节。由此概念, 物联网控制系统的构建模型如图 1-13 所示。

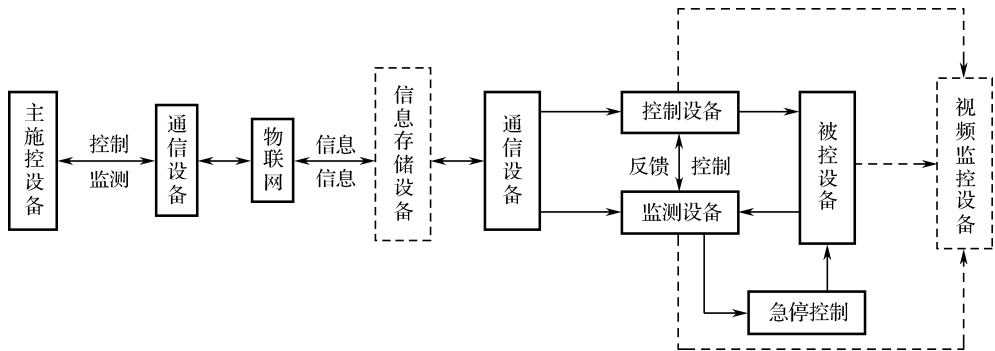


图 1-13 物联网控制系统的构建模型

## 1.3 计算机控制的发展状况与发展趋势

计算机控制技术是现代大型工业自动化和国防科学技术发展的产物，它紧密依赖于计算机技术、网络通信技术和控制技术的最新发展。

### 1.3.1 计算机控制系统的发展过程

在生产过程控制中采用数字计算机控制的思想出现在 20 世纪 50 年代中期，控制理论与计算机技术结合，产生了计算机控制系统，为自动控制系统的申请与发展开辟了新的途径。

世界上第一台电子计算机于 1946 年在美国问世，经过 10 多年的研究，到 20 世纪 50 年代末，将计算机用于过程控制。美国得克萨斯州的一个炼油厂，从 1956 年开始与美国的航天工业公司合作进行计算机控制的研究，到 1959 年，将 Rw300 计算机用于控制聚合装置，该系统控制 26 个流量、72 个温度、3 个压力、3 种成分。其功能是使反应器压力最小，确定 5 个反应器进料量的最优分配，根据催化作用控制热水流量和确定最优循环。

由于计算机控制方面的上述开创性工作，使计算机逐步渗入到各行各业中。在渗入过程中，既有高潮，也有由于某些失败项目的阴影而进入低潮。但是，最终还是逐步进入成熟期，从理论分析、系统设计，到工程实践都有一整套方法。从工作性质上来看，计算机逐步由早期的操作指导控制系统转变为直接数字控制（Direct Digital Control, DDC）系统。操作指导控制系统仅仅向操作人员提供反映生产过程的数据，并给出指导信息，而直接数字控制可以完全替代原有的模拟控制仪表，由计算机根据生产过程数据对生产过程直接发出控制作用。1962 年，英国帝国化学工业公司实现了一个 DDC 系统，它的数据采集点为 244 点，控制阀 129 个。20 世纪 60 年代，由于集成电路技术的发展，计算机技术得到了很大发展，计算机的体积缩小、运算速度加快、工作可靠、价格便宜。60 年代后期，出现了适合工业生产过程控制的小型计算机（Minicomputer），使规模较小的过程控制项目也可以考虑采用计算机控制。70 年代，由于大规模集成电路技术的发展，1972 年出现了微型计算机。微型机具有价格便宜、体积小、可靠性高等优点，使计算机控制由集中式的控制结构，也就是用一台计算机完成许多控制回路的控制任务，转变成分散控制结构。人们设计出以微型计算机为基础的控制装置。例如，用于控制 8 个回路的“现场控制器”，用于控制 1 个回路的“单回路控制器”等。它们可以被“分散”安装到更接近于测量和控制点的地方。这一类控制装置都具有数字通信能力，它们通过高速数据通道和主控制室的计算机相连接，形成分散控制、集中操作和分级管理的布局。这就是“分布式控

制系统”(Distributed Control System, DCS)。对 DCS 的每个关键部位都可以考虑冗余措施, 保证在发生故障时不会造成停产检修的严重后果, 使可靠性大大提高。许多国家的计算机和仪表制造厂都推出了自己的 DCS, 如美国 Honeywell 公司的 TDC-2000 和新一代产品 TDC-3000, 日本横河公司的 CENTUM 等。现在, 世界上几十家公司生产的 DCS 产品已有 50 多个品种, 而且有了几代产品。

除了在过程控制方面计算机控制日趋成熟外, 在机电控制、航天技术和各种军事装备中, 计算机控制也日趋成熟, 得到了广泛的应用, 如通信卫星的姿态控制, 卫星跟踪天线的控制, 电气传动装置的计算机控制, 计算机数控机床, 工业机器人的姿态, 力、力矩伺服系统, 射电望远镜天线控制, 飞行器自动驾驶仪等。在某些领域, 计算机控制已经成为该领域不可缺少的因素。例如, 在工业机器人的控制中, 不使用计算机控制是无法完成控制任务的。在射电望远镜的天线控制系统中, 由于使用了计算机控制, 引入了自适应控制等先进控制方法而大大提高了控制精度。

从 80 年代后期到 90 年代, 计算机技术又有了飞速的发展, 微处理器已由 16 位发展到 32 位, 并且进一步向 64 位过渡。高分辨率的显示器增强了图形显示功能。采用多窗口技术和触摸屏调出画面, 使操作简单, 显示响应速度更快。多媒体技术使计算机可以显示高速动态图像, 并有音乐和语音, 增强显示效果。另一方面, 人工智能和知识工程方法在自动控制领域得到应用, 模糊控制、专家控制、各种神经元网络算法在自动控制系统中同样得到应用。在故障诊断、生产计划和调度、过程优化、控制系统的计算机辅助设计、仿真培训和在线维护等方面也越来越广泛地使用知识库系统 (KBS) 和专家系统 (ES)。90 年代随着分散控制系统的广泛使用和工厂综合自动化的要求, 对各种控制设备提出了很强烈的通信需求, 要求计算机控制的核心设备, 如工业控制计算机、现场控制器、单回路调节器和各种可编程控制器 (PLC) 之间具有较强的通信能力, 使它们能很方便地构成一个大系统, 实现综合自动化的目标。这就是在自动化技术、信息技术和各种生产技术的基础上, 通过计算机系统将工厂的全部生产活动所需要的信息和各种分散的自动化系统实现有机集成, 形成能适应生产环境不确定性和市场需求多变性总体最优的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统。这种系统在连续生产过程中被称为计算机集成生产/过程系统 (Computer Integrated Production/Process System, CIPS)。与此相应, 在机械制造行业, 则称为计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)。

### 1.3.2 计算机控制理论的发展概况

采样系统理论在计算机控制方面已取得重要成果, 近年来出现了许多新型控制策略。

#### 1. 采样控制理论

计算机控制系统中包含有数字环节, 如果同时考虑数字信号在时间上的离散和幅度上的量化效应, 严格地说, 数字环节是时变非线性环节, 因此要对它进行严格的分析是十分困难的。若忽略数字信号的量化效应, 则计算机控制系统可看作采样控制系统。在采样控制系统中, 如果将其中的连续环节离散化, 从而整个系统便成为纯粹的离散系统。因此计算机控制系统理论主要包括离散系统理论、采样系统理论及数字系统理论。

##### 1) 离散系统理论

离散系统理论主要指对离散系统进行分析 and 设计的各种理论与方法, 它主要包括:

(1) 差分方程及  $z$  变换理论。利用差分方程、 $z$  变换及  $z$  传递函数等数学工具来分析离散系统的性能及稳定性。

(2) 常规设计方法。以  $z$  传递函数作为数学模型对离散系统进行常规设计的各种方法的研究, 如有限拍控制、根轨迹法设计、离散 PID 控制、参数寻优设计及直接解析设计法等。

(3) 按极点配置的设计法。包括基于传递函数模型及基于状态空间模型的两种极点配置设计方法。在利用状态空间模型时, 它包括按极点配置设计控制规律及设计观测器两方面的内容。

(4) 最优设计方法。包括基于传递函数模型及基于状态空间模型的两种设计方法。基于传递函数模型的最优设计法, 主要包括最小方差控制和广义最小方差控制等内容。基于状态空间模型的最优设计法, 主要包括线性二次型最优控制及状态的最优估计两个方面, 通常简称 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 问题。

(5) 系统辨识及自适应控制。系统辨识是根据系统的输入/输出时间函数来确定描述系统行为的数学模型, 自适应控制系统能自行调整参数或产生控制作用, 使系统仍能按某一性能指标运行在最佳状态的一种控制方法。

## 2) 采样系统理论

采样系统理论除了包括离散系统的理论外, 还包括以下一些内容:

(1) 采样理论。主要包括香农 (shannon) 采样定理、采样频谱及混叠、采样信号的恢复及采样系统的结构图分析等。

(2) 连续模型及性能指标的离散化。为了使采样系统能变成纯粹的离散系统来进行分析和设计, 需将采样系统中的连续部分进行离散化, 首先需要将连续环节的模型表示方式离散化。由于模型表示主要采用传递函数和状态方程两种形式, 因此连续模型的离散化也主要包括这两个方面。由于实际的控制对象是连续的, 因此性能指标函数也常常以连续的形式给出, 这样将更能反映实际系统的性能要求, 因此也需要将连续的性能指标进行离散化, 由于主要采用最优和按极点配置的设计方法, 因此性能指标的离散化也主要包括这两个方面。连续系统的极点转换为相应的离散系统的极点分布是一件十分简单的工作, 连续的二次型性能指标函数的离散化则需要较为复杂的计算。

(3) 性能指标函数的计算。采样控制系统中控制对象是连续的, 控制器是离散的, 性能指标函数也常常以连续的形式给出。为了分析系统的性能, 需要计算采样系统中连续的性能指标函数, 其中包括确定性系统和随机性系统两种情况。

(4) 采样控制系统的仿真。

(5) 采样周期的选择。

## 3) 数字系统理论

数字系统理论除了包括离散系统和采样系统的理论外, 还包括数字信号量化效应的研究, 如量化误差、非线性特性的影响等。同时, 还包括数字控制器实现中的一些问题, 如计算延时、控制算法编程等。

## 2. 先进控制技术

常规的控制方法如 PID 控制等在计算机控制系统中得到了广泛应用, 但这些控制策略一是要求被控对象是精确的、时不变的, 且是线性的; 二是要求操作条件和运行环境是确定的、不变的。但是由于对象的结构是时变的, 有许多不确定因素, 且多是非线性、多变量、强耦合和高维数的, 既有数字信息, 又有多媒体信息, 难以建立常规的数学模型; 其次, 运行环境改变

和环境干扰的时变,再加上信息的模糊性、不完全性、偶然性和未知性,使系统的环境复杂化;最后,控制任务不再限于系统的调节和伺服问题,还包括了优化、监控、诊断、调度、规划、决策等复杂任务。因而建立和实践了一些新的控制策略并在实际中得到改进和发展。

### 1) 鲁棒控制

控制系统的鲁棒性是指系统的某种性能或某个指标在某种扰动下保持不变的程度(或对扰动不敏感的程度)。其基本思想是在设计中设法使系统对模型的变化不敏感,使控制系统在模型误差扰动下仍能保持稳定,品质也保持在工程所能接受的范围内。鲁棒控制主要有代数方法和频域方法,前者的研究对象是系统的状态矩阵或特征多项式,讨论多项式族或矩阵族的鲁棒控制;后者是从系统的传递函数矩阵出发,通过使系统由扰动至偏差的传递函数矩阵  $H\infty$  的范数取极小,来设计出相应的控制规律。

鲁棒控制理论成果主要应用在飞行器、柔性结构、机器人等领域,在工业过程控制领域应用较少。

### 2) 预测控制

预测控制是一种基于模型又不过分依赖模型的控制策略,其基本思想类似于人的思维与决策,即根据头脑对外部世界的了解,通过快速思维不断比较各种方案可能造成的后果,从中择优予以实施。它的各种算法是建立在模型预测—滚动优化—反馈校正等3条基本原理上的,其核心是在线优化。这种“边走边看”的滚动优化控制策略可以随时顾及模型失配、时变、非线性或其他干扰因素等不确定性,及时进行弥补,减小偏差,以获得较高的综合控制质量。

预测控制集建模、优化和反馈于一体,三者滚动进行,其深刻的控制思想和优良的控制效果,一直为学术界和工业界所瞩目。

### 3) 模糊控制

模糊控制是一种应用模糊集合理论的控制方法。模糊控制是一种能够提高工业自动化能力的控制技术。模糊控制是智能控制中一个十分活跃的研究领域。凡是无法建立数学模型或难以建立数学模型的场合都可采用模糊控制技术。

模糊控制的特点是:一方面,模糊控制提供了一种实现基于自然语言描述规则的控制规律的新机制;另一方面,模糊控制器提供了一种改进非线性控制器的替代方法,这些非线性控制器一般用于控制含有不确定性和难以用传统非线性理论来处理的装置。

### 4) 神经网络控制

神经网络控制是一种基本上不依赖于模型的控制方法,它比较适用于那些具有不确定性或高度非线性的控制对象,并具有较强的适应和学习功能。

### 5) 专家控制

专家控制系统是一种已广泛应用于故障诊断、各种工业过程控制和工业设计的智能控制系统。工程控制论与专家系统的结合形成了专家控制系统。专家控制系统的主要优点有:

(1) 运行可靠性高。对于某些特别的装置或系统,如果不采用专家控制器来取代常规控制器,整个控制系统将变得非常复杂,尤其是其硬件结构,结果是使系统的可靠性大为下降。因此,对专家控制器提出较高的运行可靠性要求。它通常具有方便的监控能力。

(2) 决策能力强。决策是基于知识的控制系统的关键能力之一,大多数专家控制系统要求具有不同水平的决策能力。专家控制系统能够处理不确定性、不完全性和不精确性之类的问题,

这些问题难以用常规控制方法解决。

(3) 应用通用性好。应用的通用性包括易于开发、示例多样性、便于混合知识表示、全局数据库的活动维数、基本硬件的机动性、多种推理机制及开放式的可扩充结构等。

(4) 控制与处理的灵活性。包括控制策略的灵活性、数据管理的灵活性、经验表示的灵活性、解释说明的灵活性、模式匹配的灵活性及过程连接的灵活性等。

(5) 拟人能力。专家控制系统的控制水平具有人类专家的水准。

#### 6) 遗传算法

遗传算法是一种新发展起来的优化算法，是基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法。它将“适者生存”这一基本的达尔文进化理论引入串结构，并且在串之间进行有组织但又随机的信息交换。

遗传算法在计算机控制中的应用主要是进行优化和学习，特别是与其他控制策略结合，能够获得较好的效果。

上述的新型控制策略各有特长，但在某些方面都有其不足。因而各种控制策略相互渗透和结合，构成复合控制策略是主要发展趋势。组合智能控制系统的目标是将智能控制与常规控制模式有机地组合起来，以便取长补短，获得互补性，提高整体优势，以期获得人类、人工智能和控制理论高度紧密结合的智能系统，如 PID 模糊控制器、自组织模糊控制器、基于神经网络的自适应控制系统等。

### 1.3.3 计算机控制系统的发展趋势

计算机控制技术的发展与信息化、数字化、智能化、网络化的技术潮流相关，与微电子技术、控制技术、计算机技术、网络与通信技术、显示技术的发展密切相关，互为因果，互相补充和促进；各种自动化手段互相借鉴，工控机系统、自动化系统、信息技术改造传统产业、机电一体化、数控系统、先进制造系统、CIMS 各有背景，都很活跃。相互借鉴，相互渗透和融合，使彼此之间的界限越来越模糊。各种控制系统互相融合，在相当长的一段时间内，FCS、IPC、NC/CNC、DCS、PLC，甚至嵌入式控制系统，将相互学习、相互补充、相互促进、彼此共存。各种控制系统虽然设计的初衷不一，各有特色，各有适宜的应用领域，自然也各有不适应的地方，但技术上都知道学人之长、补己之短，融合与集成是大势所趋，势不可挡。计算机控制发展的趋势主要集中在如下几个方面：综合化、智能化、虚拟化、绿色化。

#### 1. 综合化

随着现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术的发展，综合自动化技术（ERP+MES+PCS）将会在工业过程中得到广泛应用，将企业生产过程中的有关资源、技术、经营管理三要素及其信息流、物流有机地集成并优化运行，可大大提高企业的经济效益。

#### 2. 智能化

经典的反馈控制、现代控制和大系统理论在应用中遇到不少难题。首先，这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的系统模型的基础上的，而实际系统一般难以获得精确的数学模型；其次，为了提高控制性能，整个控制系统变得极其复杂，增加了设备的投资，降低了系统的可靠性。人工智能的出现和发展，促进自动控制向更高的层次发展，即智能控制。智能控制是一种无须人的干预就能够自主地驱动智能机器实现其目标的过程，也是用机器模拟人类智能的又一重要领域。



### 3. 虚拟化

在数字化基础上，虚拟化技术的研究正在迅速发展。它主要包括虚拟现实（VR）、虚拟产品开发（VPD）、虚拟制造（VM）和虚拟企业（VE）等。

### 4. 绿色化

绿色自动化技术的概念，主要是从信息、电气技术与设备的方面出发，以减少、消除自动化设备对人类、环境的污染与损害。其主要内容包括保证信息安全与减少信息污染、电磁谐波抑制、洁净生产、人机和諧、绿色制造等。这是全球可持续发展战略在自动化领域中的体现，是自动化学科的一个崭新课题。

## 1.4 人工智能的发展



人工智能

人工智能（Artificial Intelligence, AI）是应用大量人类专家的知识 and 推理方法求解复杂实际问题的一门学科。人工智能系统的主要任务是建立智能信息处理理论，进而设计可以展现某些近似于人类智能行为的计算机系统。

人工智能的发展是以硬件与软件的发展为基础的，经历了漫长的发展历程。特别是 20 世纪 30 年代和 40 年代的智能界，出现了两件重要的事情：数理逻辑和关于计算的新思想。以维纳（Wiener）、弗雷治、罗素等为代表，他们对发展数理逻辑学科的贡献，以及丘奇（Church）、图灵和其他一些人关于计算本质的思想，对人工智能的形成产生了重要的影响。



人工智能的发展

作为一门学科，人工智能于 1956 年问世，是由“人工智能之父”McCarthy 及一批数学家、信息学家、心理学家、神经生理学家、计算机科学家在 Dartmouth 大学召开的会议上首次提出的。

人工智能的发展经历了以下几个阶段：

（1）20 世纪 50 年代，人工智能的兴起和冷落。

人工智能概念首次提出后，相继出现了一批显著的成果，如机器定理证明、跳棋程序、通用问题求解程序、LISP 表处理语言等。但由于消解法推理能力有限，以及机器翻译的失败，使人工智能走向了低谷。这一阶段的特点是：重视问题求解的方法，忽视知识的重要性。

（2）20 世纪 60 年代末到 70 年代，专家系统出现，使人工智能研究出现新高潮。

DENDRAL 化学质谱分析系统、MYCIN 疾病诊断和治疗系统、PROSPECTOR 探矿系统、Hearsay-II 语音理解系统等专家系统的研究和开发，将人工智能引向了实用化，且于 1969 年召开了国际人工智能联合会议（International Joint Conferences on Artificial Intelligence, IJCAI）。

（3）20 世纪 80 年代，随着第五代计算机的研制，人工智能得到了很大的发展。

日本 1982 年开始了“第五代计算机研制计划”，即“知识信息处理计算机系统（KIPS）”，其目的是使逻辑推理达到数值运算的速度。虽然此计划最终失败，但它的开展形成了一股研究人工智能的热潮。

（4）20 世纪 80 年代末，神经网络飞速发展。

1987 年，美国召开第一次神经网络国际会议，宣告了这一学科的诞生。此后，各国在神经网络方面的投资逐渐增加，神经网络迅速发展起来。

（5）20 世纪 90 年代至今，人工智能出现新的研究高潮。



人工智能的发展

20 世纪 90 年代,随着计算机网络、计算机通信等技术的发展,关于智能体 (Agent) 的研究成为人工智能的热点。1993 年,肖哈姆 (Shoham Y) 提出面向智能体的程序设计 [Shoham 1993]。1995 年,罗素 (Russell S) 和诺维格 (Norvig P) 出版了《人工智能》一书,提出“将人工智能定义为将从环境中接受感知信息并执行行动的智能体研究” [Russell et al. 1995]。所以,智能体应该是人工智能的核心问题。斯坦福大学计算机科学系的海斯-罗斯 (Hayes-Roth B) 在 IJCAI' 95 的特约报告中谈到:“智能体既是人工智能最初的目标,也是人工智能最终的目标” [Hayes-Roth 1995]。

人工智能模拟纳入我国国家计划的研究起始于 1978 年。1984 年召开了智能计算机及其系统的全国学术讨论会。1986 年起把智能计算机系统、智能机器人和智能信息处理 (含模式识别) 等重大项目列入国家高技术研究 863 计划。1997 年起,又把智能信息处理、智能控制等项目列入国家重大基础研究 973 计划。进入 21 世纪后,在最新制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》中,“脑科学与认知科学”已列入八大前沿科学问题之一。信息技术将继续向高性能、低成本、普适计算和智能化主要方向发展,寻求新的计算与处理方式和物理实现是未来信息技术领域面临的重大挑战。

1981 年起,我国相继成立了中国智能学会 (CAAI)、全国高校人工智能研究会、中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会、中国自动化学会模式识别与机器智能专业委员会、中国软件行业协会人工智能协会、中国智能机器人专业委员会、中国计算机视觉与智能控制专业委员会及中国智能自动化专业委员会等学术团体。1989 年首次召开了中国人工智能联合会议 (CJCAI)。1987 年创刊了《模式识别与人工智能》杂志。2006 年创刊了《智能系统学报》和《智能技术》杂志。2011 年创刊了 *International Journal of Intelligence Science* 国际刊物。



无人机智能控制技术

## 1.5 德国工业 4.0 与中国制造 2025



机器人生产线

“工业 4.0”是以智能制造为主导的第四次工业革命。世界主要发达国家都有自己的“工业 4.0”战略计划,其中德国作为全世界制造业竞争力最强的国家之一,其“工业 4.0”受到世人瞩目,在全球最受关注。德国“工业 4.0”是德国面向未来竞争的总体战略方案,在全球信息技术领域中,德国强大的机械和装备制造业占据了显著地位。为了支持工业领域新一代革命性技术的研发与创新,德国政府在 2013 年 4 月举办的汉诺威工业博览会上正式推出《德国工业 4.0 战略计划实施建议》。该计划对全球工业未来的发展趋势进行了探索性研究和清晰描述,为德国预测未来 10~20 年的工业生产方式提供了依据,因此引起了全世界科学界、产业界和工程界的关注。

德国“工业 4.0”战略,本质就是以机械化、自动化和信息化为基础,建立智能化的新型生产模式与产业结构。其主要内容概括为“一个核心”、“两重战略”、“三大集成”和“八项举措”。“智能+网络化”是德国“工业 4.0”的核心,它通过虚拟实体系统 (Cyber-Physical System, CPS) 建立智能工厂,实现智能制造。基于 CPS 系统,德国“工业 4.0”利用“领先的供应商战略”、“领先的市场战略”来增强制造业的竞争力。在具体实施过程中起支撑作用的三大集成分别是:关注产品的生产过程,在智能工厂内建成生产的纵向集成;关注产品在整个生命周期不同阶段的信息,使信息共享,以实现工程数字化集成;关注全社会价值网络的实现,达成德国制造业的横向集成。采取的八项措施分别是:实现技术标准化和开放标准的参考体系;建立

模型来管理复杂的系统；建立安全保障机制；创新工作的组织和设计方式；注重培训和持续的职业发展；健全规章制度；提升资源效率。德国“工业 4.0”的发展目标一方面是消除工业控制与传统信息管理技术之间的距离，另一方面是建设智能工厂并进行智能生产。这意味着未来工业的发展将进入一个智能通道，机器人将摆脱人工操作，从原料到生产再到运输的各个环节都可以被各种智能设备控制。云技术则能把所有的要素都连接起来，生成大数据，自动修正生产中出现的任何问题。

2015年5月，中国政府发布了《中国制造2025》，坚持“创新驱动、绿色发展、结构优化、以人为本”的基本方针，坚持“市场主导、政府引导、立足当前、着眼长远、整体推进、重点突破、自主发展、开放合作”的基本原则，通过“三步走”实现制造强国的战略目标：第一步，到2015年迈入制造强国行列；第二步，到2035年中国制造业整体达到世界制造强国阵营中等水平；第三步，到新中国成立一百年时，综合实力进入世界制造强国前列。

“中国制造2025”以创新驱动发展为主题，以信息化与工业化深度融合为主线，以推进智能制造为主攻方向。

## 习题

1. 计算机控制系统中的实时性、离线方式和在线方式的含义是什么？
2. 计算机控制系统硬件由哪几部分组成？说明各部分的主要功能。
3. 计算机控制系统按功能分类有几种？
4. 计算机控制系统软件有什么作用？
5. 说明 DDC 与 SCC 系统的工作原理、特点，它们之间有何区别和联系？
6. DCS 与 FCS 相比各有什么特点？
7. 离散控制理论包括哪些内容？
8. 说明先进控制技术的特点及应用。
9. 计算机控制的主要发展趋势是什么？
10. 人工智能发展的趋势是什么？