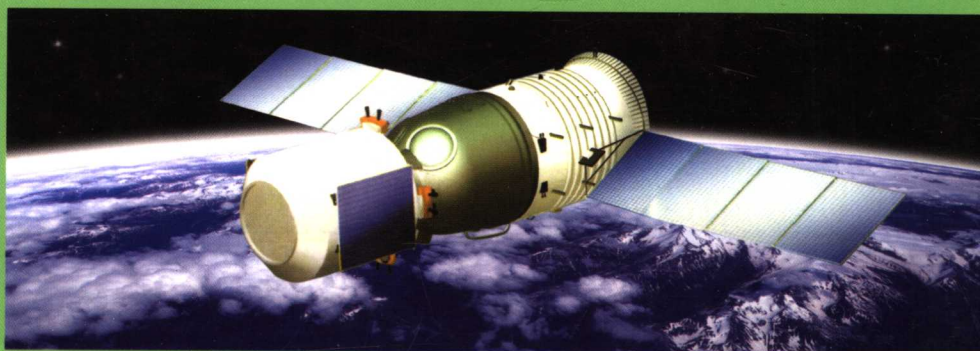


21世纪高等学校自动控制类系列教材

# 计算机控制理论与应用



李铁桥 张虹 主编  
张晋格 审

哈尔滨工业大学出版社

21 世纪高等学校自动控制类系列教材

# 计算机控制理论与应用

李铁桥 张 虹 主 编  
张晋格 审

哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨

## 内 容 简 介

本书是作者根据多年的教学经验,结合自动化专业教学改革的需要而重新编写的本科生教材。

本书共分六章,包括:绪论,计算机控制理论基础,数字控制器的“模拟”设计方法,基于输入输出模型的控制器设计,状态空间模型设计法,预测与自适应控制。本书系统性好、重点突出、实用性强,较好地反映了计算机控制系统的发展趋势。

本书可作为高等学校自动化、测控技术、电气工程、计算机以及机械电子工程类各专业的本科生教材,也可供研究生和从事控制领域工作的有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机控制理论与应用/李铁桥,张虹主编. —哈尔滨:  
哈尔滨工业大学出版社,2005.8

ISBN 7-5603-2166-6

I.计… II.①李…②张… III.计算机控制 IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 065075 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨市龙华印刷厂  
开 本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 285 千字  
版 次 2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5603-2166-6/TP·217  
印 数 1~4 000  
定 价 18.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

为了适应 21 世纪高素质科技人才培养的需要,我国教学改革正按照“优化知识结构,培养创新意识,提高综合素质”的总原则向纵深发展。为适应这种态势,哈尔滨工业大学开始了对现代控制工程基础理论课程体系与教材建设的研究工作,其研究成果获“黑龙江省优秀高等教育科研成果”一等奖。在此基础上,结合目前我国多数工科院校的课程设置情况与教学现状,决定编写一套控制工程基础理论系列教材(“自动控制原理”、“现代控制理论基础”、“计算机控制理论与应用”、“智能控制技术”),本系列教材已确定为“十五”期间哈尔滨工业大学重点教材。

本书共分六章。第一章重点介绍计算机控制系统的基本概念、组成、特点、分类和发展趋势;第二章介绍计算机控制系统的理论基础,包括采样定理、信号变换理论、 $z$  变换、计算机控制系统的脉冲传递函数和离散系统的状态空间理论;第三章介绍计算机控制系统的“模拟”设计方法,包括数字 PID 控制算法及其改进,复杂控制系统如串级控制、前馈控制和大迟后对象补偿控制的计算机实现;第四章介绍计算机控制系统的输入输出模型设计方法,主要包括普通计算机控制系统的设计和最少拍控制系统及达林算法;第五章介绍计算机控制系统的状态空间极点配置设计、状态观测器设计及线性二次型最优控制系统;第六章介绍预测与自适应控制系统,重点在预测模型、参考轨迹、控制算法及纯迟后对象的预测控制、应用李雅普诺夫第二法的模型参考自适应控制系统设计以及自校正控制器设计。本书力求简单明了、重点突出,既比较实用又不失理论的完整性与系统性。每章后配有一定量的习题,以加深学生对理论的理解和掌握。

本书第一章由李铁桥编写,第二、三章由张虹编写,第四、五、六章由马琳编写。全书由李铁桥、张虹主编,张晋格教授主审。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学自动化和测控技术系诸多同志的帮助,在此致以衷心感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者予以批评指正,以使本书在内容上不断趋于完善。

作 者

2005 年 5 月

# 目 录

## 第一章 绪论

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 1.1 计算机控制系统概述 .....    | (1) |
| 1.2 计算机控制系统的类型 .....   | (3) |
| 1.3 计算机控制系统的发展趋势 ..... | (5) |
| 习题 .....               | (8) |

## 第二章 计算机控制理论基础

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 2.1 信号变换理论 .....              | (9)  |
| 2.2 线性离散系统的差分方程 .....         | (15) |
| 2.3 脉冲传递函数数学基础—— $z$ 变换 ..... | (18) |
| 2.4 离散系统脉冲传递函数 .....          | (29) |
| 2.5 计算机控制系统性能分析 .....         | (35) |
| 2.6 线性离散系统的稳定性分析 .....        | (43) |
| 2.7 计算机控制系统的根轨迹分析法 .....      | (49) |
| 2.8 离散系统的状态空间描述 .....         | (52) |
| 2.9 离散状态方程的求解 .....           | (61) |
| 2.10 线性离散系统的能控性与能观性 .....     | (63) |
| 2.11 离散状态空间标准型 .....          | (67) |
| 习题 .....                      | (72) |

## 第三章 数字控制器的“模拟”设计方法

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 3.1 模拟化设计 .....       | (78)  |
| 3.2 数字 PID 控制器 .....  | (83)  |
| 3.3 数字 PID 参数整定 ..... | (87)  |
| 4.4 复杂控制 .....        | (90)  |
| 习题 .....              | (103) |

## 第四章 基于输入输出模型的控制器设计

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 4.1 基于一般模型的控制器设计 .....    | (105) |
| 4.2 影响因素分析及控制器的实现方法 ..... | (112) |
| 4.3 最少拍控制器设计 .....        | (118) |
| 4.4 达林算法 .....            | (127) |

---

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| 习题 .....                                      | (131) |
| <b>第五章 状态空间模型设计法</b>                          |       |
| 5.1 基于状态空间模型的控制器极点配置设计 .....                  | (133) |
| 5.2 状态观测器设计 .....                             | (141) |
| 5.3 最优控制设计 .....                              | (147) |
| 习题 .....                                      | (154) |
| <b>第六章 预测与自适应控制</b>                           |       |
| 6.1 预测控制系统设计 .....                            | (158) |
| 6.2 模型参考自适应系统设计 .....                         | (168) |
| 6.3 参数自适应控制系统设计 .....                         | (173) |
| 习题 .....                                      | (178) |
| <b>附录 常用函数的拉氏变换及 <math>z</math> 变换表</b> ..... | (180) |
| <b>参考文献</b> .....                             | (181) |

# 第一章 绪 论

## 1.1 计算机控制系统概述

### 一、计算机控制系统的一般概念

在生产过程中,广泛涉及对生产设备运行状态(如电机启停、转速及转角)和生产过程参数(如温度、压力、流量及物位等)的自动控制。一般前者称为拖动自动控制,后者称为过程自动控制。

通常所说的自动控制系统,既包括拖动自动控制系统,也包括过程自动控制系统。

由于计算机技术的快速发展,特别是微型计算机性能的日臻完善,目前计算机已广泛应用于控制系统,用以代替传统的常规模拟控制仪表,组成计算机控制系统。

典型的计算机控制系统的基本结构如图 1.1 所示。它由被控对象、传感变送器、执行器和计算机系统组成。计算机系统的核心是处理器。由于计算机处理的是数字量,而执行器的输入和传感变送器的输出通常都是模拟信号,所以计算机系统一般都包含有数/模(D/A)及模/数(A/D)转换器。

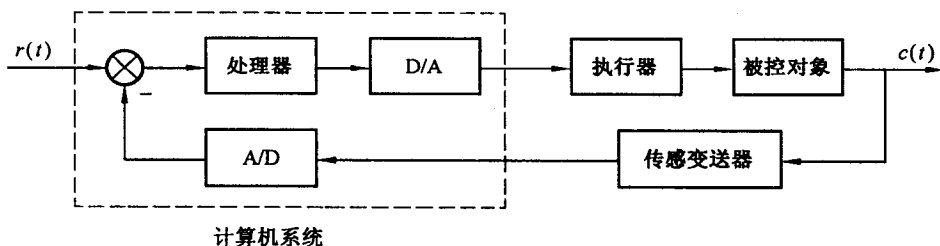


图 1.1 典型计算机控制系统的基本结构

计算机系统的任务是实现对被控对象的数据采集和偏差计算,并根据对控制指标的要求做出控制决策,产生相应的控制信号,对被控对象进行实时控制。

计算机系统的控制规律由软件编程实现。

### 二、计算机控制系统的组成

计算机控制系统的组成如图 1.2 所示。它由广义对象(被控对象 + 传感变送器 + 执行器)和计算机系统两部分组成,而计算机系统又包括硬件和软件两部分。

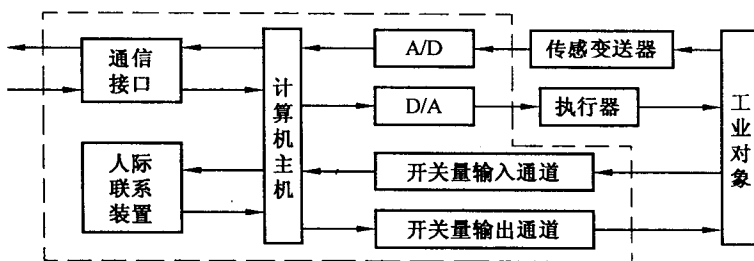


图 1.2 计算机控制系统的组成

### 1. 计算机硬件系统

计算机硬件系统主要包括主机、过程输入输出通道和人机联系装置三部分。

(1) 主机。主机主要包括处理器(CPU) 和内存(RAM 和 ROM) 两部分。处理器是计算机控制系统的核心,它主要负责数据处理、控制决策,并向被控对象发送控制信息。内存则用于存储数据(一般是 RAM) 和程序(一般是 ROM)。

(2) 过程输入输出通道。过程输入输出通道是计算机系统与广义对象之间信息交换的桥梁和纽带。过程通道又分为模拟过程通道和开关过程通道。

模拟过程通道主要用来传输模拟信号。对象的各种连续变化的物理量经传感变送器转换成连续的电信号,通过模拟输入通道输入给计算机。而计算机的控制信号需经模拟输出通道传送给执行器,以实现对被控对象的控制。

开关过程通道主要用来传送计算机与对象之间的开关信号和数字量。如被控对象料位的高低、开关的开合、电平的高低及信号的频率等。开关过程通道也分为开关量输入通道和开关量输出通道两种。

模拟过程通道和开关过程通道最大的差别在于有无 A/D(或 D/A) 转换器。

(3) 人机联系装置。人机联系装置主要包括键盘、显示器、打印机、绘图仪、操作台、硬盘、光盘等输入及输出设备。其主要功能是显示、记录、存储工业对象的有关参数或运行状态,可以实现操作人员对控制过程的干预和调整。

数据通信是实现计算机联网和信息交换的重要手段。有些智能化设备,如传感器和执行器也具有数据通信功能。根据不同的使用目的,通信设备可以列入人机联系装置或者纳入过程输入输出通道。

### 2. 计算机软件系统

软件系统是计算机程序的总和。主要分为以下两种。

(1) 系统软件。系统软件是由计算机厂商提供的。它是系统的基本配置软件,主要包括各种程序设计与开发系统、计算机监视管理系统、操作系统、数据库系统以及通信网络软件等。控制系统设计人员要充分利用系统软件提供的环境,有效地进行应用软件的设计与开发。

(2) 应用软件。应用软件是为解决具体控制问题而开发的专用软件,一般包括数据采集、处理、控制运算、数据存储、操作处理、显示、打印等程序。应用软件的优劣会对系统功能、精度和效率等造成很大影响。

控制运算程序是应用软件的核心,是实施控制方案的关键。同样的硬件系统,不同的控制软件,可能产生不同的控制效果。而好的硬件则是软件发挥作用的基础。硬件和软件是构



成计算机控制系统的两个重要方面,二者相辅相成,不可偏颇。

### 三、计算机控制系统的特点

由于计算机具有运算速度快、精度高、数据存储量大、运算功能强以及可编程等优点,因此计算机控制系统与模拟控制系统相比具有一些突出的特点。

#### 1. 主要优点

(1) 实现复杂的控制规律,而且修改方便。计算机控制系统的控制规律是由软件编程实现的,它不仅可以实现常规 PID 控制规律,而且可以实现模拟控制系统无法实现的复杂控制规律,如最优控制、自适应控制、预测控制以及各种智能控制等。由于改变系统的控制方案并不需要更换系统的硬件组成,因此具有控制功能选择、组合、修改方便的特点。

(2) 具有系统组态的灵活性。计算机具有数据通信功能,信息传输成本低、距离远、抗干扰,而且可以进行多机联网。它既可以组成单机直接数字控制系统,也可以组成多机复杂控制系统,具有系统组态的灵活性。

(3) 适应性强,可靠性高。计算机对环境的适应性强,对温度、湿度以及元件使用时间不敏感。不会产生常规模拟控制仪表参数漂移的现象,适应性强、可靠性高。

(4) 具有良好的性能价格比。计算机控制系统易于实现多参数联合控制,当增加控制回路时不会显著增加设备成本。此外计算机控制系统可以方便地实现模拟仪表难于实现的诸如屏幕显示、绘图、打印、数据存盘、参数报警等功能,可以用较低的成本完成复杂的工作。

#### 2. 主要缺点

和模拟控制系统相比,计算机控制系统的主要缺点和不足有:

(1) 量化及数字运算误差会限制系统的精度,并引入噪声。

(2) 计算机数字输出信号使执行器的输出变化“陡峭”,影响控制质量。

(3) 受采样周期影响,会增加控制系统迟后时间、减少带宽,控制质量与同样的模拟系统相比较低。

## 1.2 计算机控制系统的类型

计算机控制系统可以按不同方法进行分类。例如,按控制方式不同,可以分为开环控制系统和闭环控制系统;按被控参量不同,可以分为温度控制系统、压力控制系统、物位控制系统等;按设定值变化规律不同,可以分为定值调节系统、随动控制系统、程序控制系统等;按控制特点和系统复杂程度不同,可以分为单回路控制系统、串级控制系统、大迟后控制系统、解耦控制系统等;按控制规律不同,可分为 PID 控制、自适应控制、预测控制以及智能控制等。

通常根据计算机参与控制的方式、特点以及系统的结构,可以将计算机控制系统分为下述四种基本类型。

### 一、数据采集系统

数据采集系统(DAS)又称操作指导系统,其系统框图如图 1.3 所示。

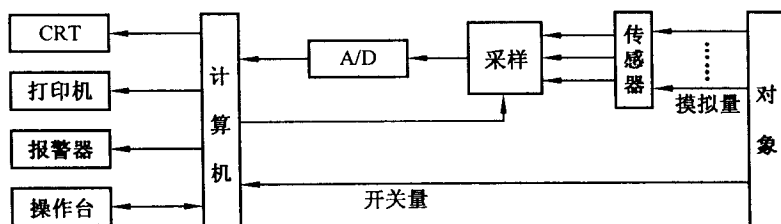


图 1.3 DAS 系统框图

在数据采集系统中计算机并不直接参与控制,它的主要作用是进行被控对象的参数采集、数据处理,通过输出设备(如显示器、打印机、绘图装置等)给出数据处理结果,以实现对生产过程的集中监视,并提供操作指导意见。它可以进行参数越限判断和报警,以确保生产安全。

## 二、直接数字控制系统

直接数字控制系统(DDC)是计算机控制系统的基本类型,图 1.2 所示的系统就是典型的 DDC 控制系统。这类系统的计算机不仅可以进行对象参数采集和数据处理,而且可以直接代替模拟控制仪表通过执行器对生产设备进行实时控制。系统的控制规律由软件编程实现,可以实现传统的 PID 控制,也可以实现复杂的控制规律。

## 三、监督控制系统

监督控制系统(SCC)的组成框图如图 1.4 所示,它是由 SCC 计算机和 DDC 系统组成的两级控制系统。

SCC 计算机主要负责系统的数据采集和 DDC 系统的给定值实时设定。

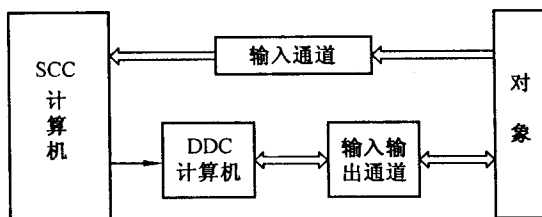


图 1.4 SCC 系统组成框图

一般 DDC 系统的给定值是预先设定的,它不能随生产工况的变化而改变,因而使系统的控制质量受到影响。而 SCC 系统由于 SCC 计算机可以根据数据采集结果按一定的优化模型计算出最佳给定值,并发送给 DDC 计算机,因此可以实现生产的优化控制。

SCC 系统的下一级也可以采用模拟控制仪表组成计算机 + 模拟混合控制系统。此时 SCC 计算机的作用与 SCC + DDC 系统相同。

## 四、集散控制系统

集散控制系统(DCS)是根据分散控制、集中操作、分级管理的原则设计的多级控制系统,一般自下而上可分为三级。其系统组成框图如图 1.5 所示。

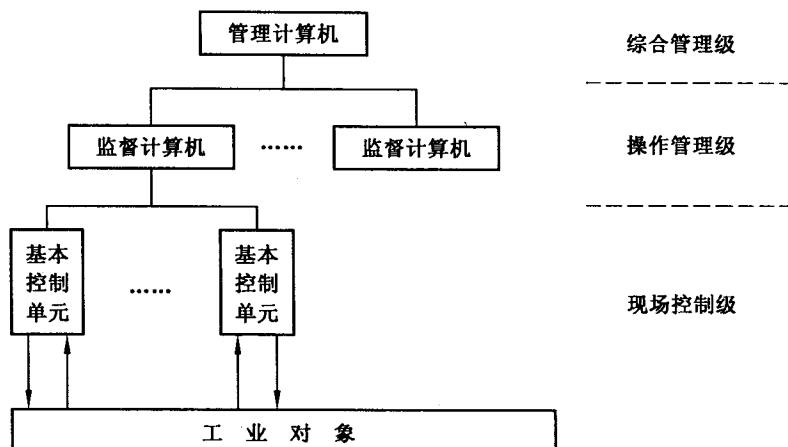


图 1.5 DCS 系统组成框图

由基本控制单元组成的现场控制级是 DCS 系统的基础。基本控制单元可实现对象的参数采集和直接数字控制,它有设备监测、故障诊断和报警功能。控制单元采取了一系列高可靠性措施和冗余技术,具有自检查、自诊断和自修复功能。

操作管理级主要由监督管理计算机组成。它负责管理全系统所有信息,显示操作与控制回路的组态和系统运行状况及其参数,监督与协调现场单元的工作,根据优化策略进行分析计算并发送新的设定值给现场控制单元,以实现系统的优化控制。

综合管理级是系统的最高级,起总体协调作用。它可包括企业的生产管理和经营管理,诸如生产组织柔性调度、工厂级的数据监测、统计、报表制定、库存管理、市场营销、财政报告、人事管理等。

数据传输是 DCS 系统实现分散控制、集中管理的关键。高速数据传输通道是把分散的现场控制单元、监督计算机、操作站等联系起来的纽带。它可以实现数据传输和信息交换,达到对系统整体优化控制和有效管理的目的。

高可靠性是 DCS 系统的突出优点。根据风险分散、就地控制的原则,DCS 系统将复杂的工业对象分解成若干个子对象,由现场控制单元对子对象实施局部控制。当控制单元发生故障时,事故影响范围会显著缩小。同时由于系统采用了高可靠性技术,系统平均无故障时间(MTBF)可高达  $5 \times 10^4$  h 以上。

此外,DCS 系统硬件采用积木式结构,软件采用模块化设计,这些都为 DCS 系统的组装、扩展、推广、使用和维护带来了很大的方便。

目前 DCS 系统在控制领域、特别是在过程控制中已得到了广泛应用。

### 1.3 计算机控制系统的发展趋势

计算机控制已经成为工业自动化领域无可替代的控制手段。在有些领域(例如飞行器控制),没有计算机简直是不可想象的。

目前,计算机控制有如下几个发展趋势。

## 一、仪表微机化

将单片机嵌入常规模拟仪表,组成微机化仪表承担测控任务是计算机控制系统的发展趋势之一。

目前市场上推出的具有数字功能的变送器、调节器和执行器就属此类。

微机化仪表不仅体积小、可靠性高,而且功能齐全。许多微机化仪表都具有零点校正、量程切换、环境误差补偿、线性化处理、掉电保护以及自诊断等功能。微机化仪表还具有数据通信功能,可以和计算机联网组成复杂控制系统。

## 二、采用工业控制机和可编程控制器

工业控制计算机(IPC) 是用于工业控制的专用计算机。总线式 IPC 采用模板式结构,机箱内主要有主机板、功能模块板、I/O 接口板等。通常现场信号不直接与 I/O 接口板相连,需经信息调理板进行信号调理和隔离,这样不仅扩大了 I/O 接口板的功能,而且提高了系统的安全性。一块 I/O 接口板可以接不同的调理板,I/O 接口板的品种和数量可以根据控制需要自由选择。模板间通过总线连接。内部总线常用的有 PC、STD、VME、MULTI、EISA、VESA 和 PCI 总线等。为防止模板故障通过总线扩散,模板上有驱动和隔离电路。外部总线可实现计算系统互连,进行信息交换。IPC 的 CPU 功能强大,软件支持丰富,I/O 接口板品种齐全、价格低廉、可靠性高,因此 IPC 控制系统具有组态灵活、易于扩展、联网升级方便、平均无故障时间(MTBF)长(10 年以上)、便于维护等特点。此外它不仅可以实现连续量控制,还具有可编程控制器控制功能。

可编程控制器(PLC) 是常规继电逻辑控制与计算机技术相结合的产物。它由 CPU、存储器、输入输出模块和编程器等组成。编程器是专门用来编制、调试和监控用户程序的装置,可以一机多用。它可以采用助记符语言、梯形图或高级语言编程。CPU 是 PLC 的核心部件,它通过周期性扫描方式逐条解释并执行用户程序。程序中的输入输出数据取自数据映象寄存器。PLC 的输入输出信号可以是开关量,也可以是模拟信号。它有延时继电器功能,有通信联网、成组数据传送、矩阵运算、排序查表、中断控制、自诊、报警、监控等功能。

PLC 硬件采用模板式结构,软件采用模块化设计。可以实现硬件的编程连接,即所谓“软接线”方式,因而具有扩展和删减系统方便、应用灵活、安装简单、易于维护的特点。此外 PLC 的输入输出模块与 IPC 不同,它可以直接与现场信号连接,能实现电平转换、电气隔离、脉冲计数及 A/D、D/A 转换,甚至还有智能 I/O 单元。工作可靠是 PLC 的最大优点,它可以适应工业现场高温、高湿、强冲击、强振动等恶劣条件,平均无故障时间可达几万小时。PLC 不仅适合逻辑控制,而且还有顺序控制及模拟控制功能。

## 三、应用远程 I/O 控制系统

无论是 DDC 还是 DCS 系统,计算机与现场仪表间信号传输多以(0 ~ 10)mA DC 或(4 ~ 20)mA DC 模拟信号为主。这不仅使信号传输线增多,增加了设备成本,而且也降低了系统的可靠性及抗干扰能力。

远程 I/O 控制系统在计算机与现场仪表之间增加了前端模块。计算机可通过内装网络接口卡或单独设置的网络接口模块,经通信总线与现场的前端模块连接。每个前端模块可以

是单体型结构(置于金属外壳内),也可以是单板结构(安装在专用机箱内)。前端模块是一种智能型设备,通过软件控制可指定某个通道为输入或输出通道。有量程范围及工作方式选择、数据处理、量程切换、数字滤波、单位变换、零点校正、线性化处理以及热电偶冷端补偿等功能。具有精度高、抗干扰、功耗低及可靠性高的优点。

每个前端模块可挂接 20 个测控点,每个网络接口可接 30 个智能前端,因此一条通信线路可以远距离传送 600 个测控点信息。

远程 I/O 系统通过智能前端和网络接口模块(或卡)把计算机 I/O 接口扩展到了控制现场。通过通信总线实现双向信息传输,不仅减少了敷线投资费用,更重要的是提高了系统的可靠性和可维护性,并增强了系统的功能。

#### 四、运用现场总线技术

现场总线(FB)技术是近年国际自动化领域的热点技术。与远程 I/O 系统不同,它直接把现场微机化仪表与远程监控计算机挂接在一条信息传输总线上。总线按照公开、规范的通信协议实现全数字化、双向、多信息、多主站数据传输和信息交换。

开放是现场总线系统的最大特点。开放不仅指规范、标准的一致、公开,而且强调对规范、标准达成共识并共同遵守。不同厂商的产品可以相互取代、相互连接、数据共享。用户根据控制需要组成系统,具有高度自主权。

现场总线系统的另一个突出特点是现场测控仪表微机化,具有智能化和自治性。它们具有测量、传感、补偿计算、数据处理、量程转换、控制计算、数据通信以及故障诊断等多种功能,不但准确性高、可靠性强,而且减少了信号转换和传输误差。仅依靠现场测控仪表便可实现多种检测和控制功能,因此可以形成一种新的全分散化的控制体系。

现场总线系统的上述特点使系统结构更为简化,为控制系统的设计、安装、投运和推广带来了很大方便,而且还可以使费用大大降低,提高了系统的可靠性。

#### 五、推出现场总线型分散控制系统

现场总线型分散控制系统(FCS)将现场总线技术引入到 DCS 系统中,淘汰了传统 DCS 系统输入输出结构,以微机化仪表作为现场测控设备,组成具有开放性、全集成化的新一代分散型控制系统。

现场总线是 FCS 系统的底层网络,主要承担生产现场的测量控制任务。它由多个网段组成,每个网段以测控仪表作为节点,可实现网段内不同节点间的信息共享,不同网段通过网桥连接。现场总线还可与互联网 Internet、企业内部网 Intranet 相连,实现不同网段及现场与控制管理层之间的网络连接与信息共享。在把现场设备运行状态、参数及故障信息传送到控制室的同时,又将各种控制、维护、组态命令等传送给现场测控设备。总线网络信息传输具有实时性强、可靠性高的特点,传输速率通常一般在几 Kbps 到 10 Mbps 之间。

此外由于计算机技术的发展,通用 PC 机及其软件系统日臻完善,性能不断提高而价格日趋下降,在 FCS 系统中采用通用 PC 机及商品化系统软件代替 DCS 系统专用 PC 机也是一个发展趋势。

近年来,在国际上如日本横河、美国霍尼韦尔、德国西门子等企业都先后推出了这种开放性、全集成化的 FCS 系统。

## 六、采用新型控制规律

PID 控制自 20 世纪 40 年代应用以来,一直是控制领域应用最为广泛的一种控制规律。因其有原理简单、适应性强、鲁棒性好、易于实现等优点,深受人们的青睐。

由于生产规模不断扩大,生产过程日益复杂,被控对象往往具有时变、非线性以及多输入多输出等特点,仅采用 PID 算法有时很难达到控制要求。以状态空间为基础的现代控制理论,为分析设计复杂控制系统提供了新的理论基础。建模理论、系统辨识、最优控制等在控制工程中已经得到了较为广泛的应用。对于难于建立数学模型或数学模型不确定及无法用数学模型表示的系统,模糊控制、自适应控制和预测控制已经体现了突出的优点。目前在人工智能和大系统理论方面的研究和应用,是现代控制理论在深度和广度上的进一步发展,正受到控制工程界的普遍重视,并已经在专家控制系统、神经网络控制、递阶控制、遗传控制算法等方面取得了可喜成绩。

将现代控制理论的所有最新成就应用于计算机控制系统,采用一些新型的控制规律解决复杂系统的控制问题,是计算机控制系统发展的又一趋势。

## 习 题

- 1.1 简述典型计算机控制系统的基本组成,分析各组成部分的作用。
- 1.2 计算机控制系统的硬件和软件各由哪几部分组成,主要功能是什么?
- 1.3 简述计算机控制系统的主要特点。
- 1.4 说明 DAS、DDC、SCC 及 DCS 系统的结构特点及其工作原理。
- 1.5 简述计算机控制系统的发展趋势。

## 第二章 计算机控制理论基础

由于计算机控制系统中包含有采样装置,其本质是离散系统或近似的离散系统,要用定性或定量的方法研究这种物理系统,必须借助一定的数学工具,建立系统的数学模型,并利用相应的分析手段进行系统的分析和综合。本章主要以线性系统为基础,介绍离散系统的基本概念和分析方法,包括信号变换理论、数学模型的建立、 $z$ 变换和系统的状态空间描述等。

### 2.1 信号变换理论

图 2.1 为一典型计算机控制系统的信号流程图。从图中可以看出,系统的被调量  $c(t)$  是时间上连续的模拟信号,采样装置输出  $c_m^*(t)$  是离散模拟信号,A/D 的输出  $c_m(k)$  是数字信号,计算机接收、处理、输出的是数字信号,D/A 的输出  $u(t)$  是时间上连续(幅值不连续)的模拟信号。这几种信号的表达形式不同,处理方式也不一样,因而在分析和设计计算机控制系统时应首先了解这几种信号之间的内在关系。

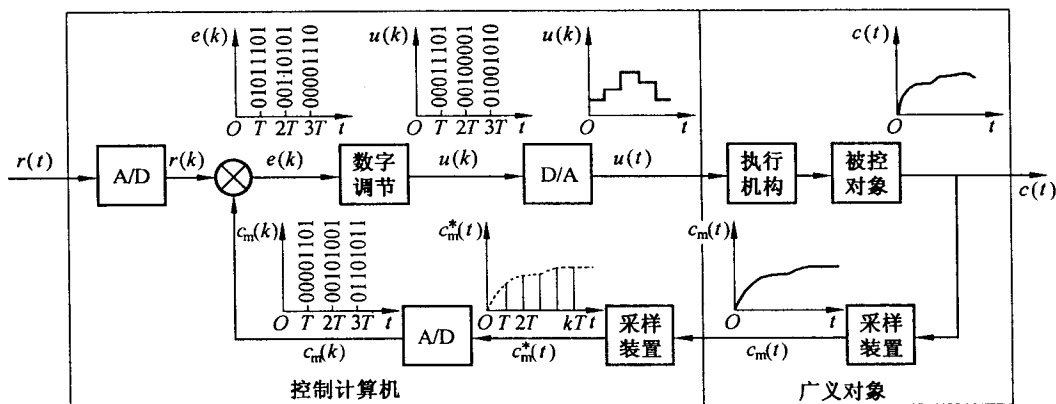


图 2.1 计算机反馈控制系统

#### 一、模拟量的采样和量化

把时间和幅值上连续的模拟信号  $f(t)$ , 按一定的时间间隔  $T$  转换成在  $0, T, 2T, 3T \dots$  时刻的一连串脉冲输出信号  $f(kT)$  的集合  $f^*(t)$  的过程称为采样过程, 如图 2.2 所示。其中  $k$  时刻的采样值  $f(kT)$  常简称为  $f(k)$ , 相应的采样装置称为采样器或采样开关。把相邻两个采样之间的时间间隔  $T$  称为采样周期, 把输入信号  $f(t)$  称为原信号; 输出  $f^*(t)$  称为采样信号。当采样开关闭合时间  $\tau$  很小时, 可认为  $f^*(t)$  即是  $f(t)$  在闭合时的瞬时值。若  $\tau \ll T$ , 则采样器可认为是一理想采样开关, 如图 2.3 所示。

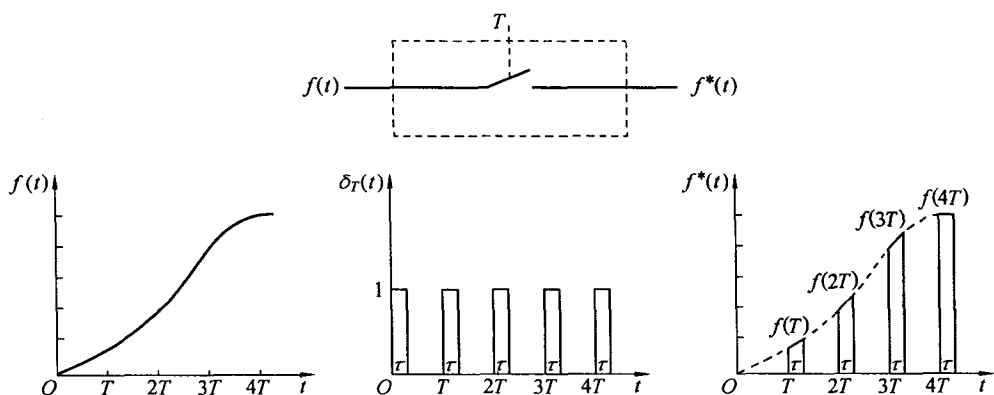


图 2.2 连续信号的采样过程

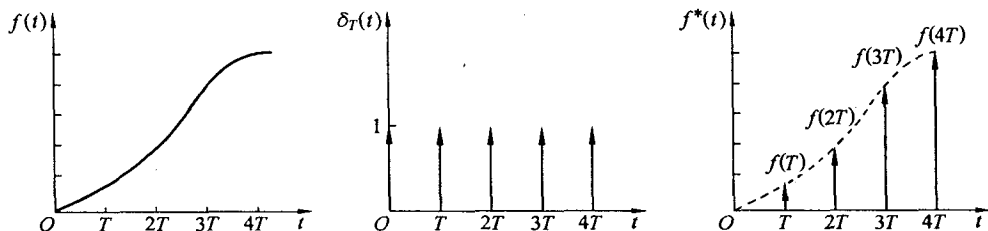


图 2.3 理想采样的脉冲调制过程

### 1. 采样过程的数学描述

设图 2.3 中  $f(t)$  为原信号, 采样周期为  $T$ , 则采样信号  $f^*(t)$  可描述为

$$\begin{aligned} f^*(t) &= f(0) + f(T) + f(2T) + \cdots + f(kT) + \cdots = \\ &= f(t)\delta(t) + f(t)\delta(t-T) + f(t)\delta(t-2T) + \cdots + f(t)\delta(t-kT) + \cdots = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} f(t)\delta(t-kT) = f(t) \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t-kT) \end{aligned}$$

式中,  $\delta(t-kT)$  为单位脉冲序列, 则开关可由构造函数

$$\delta_T = \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t-kT) \quad (2.1)$$

来描述(理想采样开关的数学模型)。

采样开关也可看做是脉冲调制器, 采样过程看做是脉冲调制过程,  $f(t)$  为被调制信号,  $\delta_T(t)$  为单位脉冲序列, 则理想采样过程可描述为

$$f^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT)\delta(t-kT) \quad (2.2)$$

或

$$f^*(t) = f(t)\delta_T(t) \quad (2.3)$$

### 2. 信号的量化

将时间上离散、幅值上连续变化的离散模拟信号  $f^*(t)$  用二进制数表示的过程即为信号的量化。它是以  $q$  为二进制数的最低有效位对应的整量单位(称为量化单位), 将  $f^*(t)$  的幅值用  $q$  的整数倍  $f_d^*(t)$  表示的过程。



设  $f^*(t)$  的变化范围为  $(f_{\min}, f_{\max})$ ,  $f_d^*(t)$  的二进制数的字长为  $n$  位, 则量化单位  $q$  为

$$q = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2^n} \quad (2.4)$$

### 3. 量化误差

采样信号  $f(kT)$  的幅值是连续变化的, 而量化信号  $f_d(kT)$  则是以  $q$  的整数倍表示的, 所以必然存在“舍、入”问题。一般采用“四舍五入”, 大于  $\frac{q}{2}$  入, 小于  $\frac{q}{2}$  舍。这样就会产生量化误差  $e(kT)$ , 即  $e(kT) = f(kT) - f_d(kT)$ , 如图 2.4 所示。

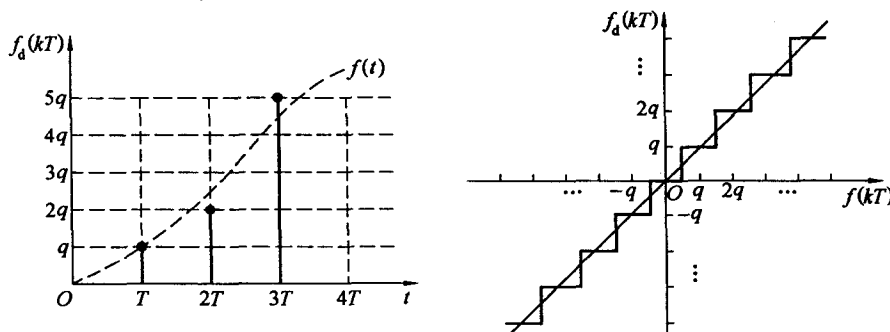


图 2.4 “四舍五入”的量化特性

在计算机控制系统中量化误差相当于一个随机干扰, 对系统是一种有害因素。当模数转换的位数足够长, 即  $q$  足够小时, 在工程上可以忽略量化误差对系统的影响。

**例 2.1** 若已知  $f^*(t)$  的变化范围为  $(-5, +5)$ , 转换字长为 8 位, 求输入  $+3.5$  时对应的数字信号, 并确定其量化误差。

**解** 其量化单位为

$$q = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2^n} = \frac{5 - (-5)}{2^8} = 0.039\ 062\ 5$$

则  $+3.5$  对应的数字信号为

$$\frac{3.5}{q} = \frac{3.5}{0.039\ 062\ 5} = 90$$

量化误差为

$$e(kT) = f(kT) - f_d(kT) = 3.5 - 90 \times q = 3.5 - 90 \times 0.039\ 062\ 5 = -0.015\ 625$$

## 二、采样定理

### 1. 采样信号频域分析

将开关构造函数式(2.1)向负时间轴方向延伸, 则可将其展开为傅里叶级数

$$\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_s t} \quad (2.5)$$

式中,  $\omega_s = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_s$  为采样角频率;  $C_k = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-jk\omega_s t} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T} \delta(t) dt = \frac{1}{T}$ 。

考虑到我们讨论的是时间信号, 当  $t < 0$  时应为零。所以

$$f^*(t) = f(t) \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) = f(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T} e^{jk\omega_s t} = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2.6)$$

对式(2.6)求拉氏变换, 则