



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

计算机控制系统

◎ 李 擎 主编

JISUANJI KONGZHI XITONG



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

计 算 机 控 制 系 统

主 编 李 擎

副主编 曹荣敏

参 编 侯 明 吴细宝 唐德翠

12110000 104 170



机 械 工 业 出 版 社

本书不仅给出了理论分析结果,而且简要地阐述了算法步骤、MATLAB 仿真工具的应用和对一些实际问题的仿真处理过程,每章都附有典型例题。本书主要内容包括:计算机控制系统的基础理论;模糊控制、离散状态空间设计法(极点配置法、最优控制)、PID 及其改进方法、数字控制器直接设计法等控制策略及其算法;工控机、PLC、DSP、单片机等控制用计算机及其应用实例,阐述如何构建和实现计算机控制系统(设计方法、接口技术、电磁兼容技术、现场总线技术、组态技术等);基础实验指导。

本书例题丰富,实用性强,提倡以实验为主导,培养学生工程实践能力。本书可作为高等学校自动化、电气技术、智能科学与技术、机电一体化、电子信息、测控技术、计算机应用及其他相关专业的教学用书。对于广大的工程技术人员,也是一本有价值的参考书和培训教材。

先修课程:微机原理及应用、软件技术基础和自动控制理论。

本书配有免费课件及习题解答,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统/李肇主编. —北京:机械工业出版社, 2011.8

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-34304-2

I. ①计… II. ①李… III. ①计算机控制系统 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 108377 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吉 玲 责任编辑: 吉 玲

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.5 印张 · 519 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-34304-2

定价: 38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

计算机控制是以自动控制理论、计算机技术和通信技术为基础的一门工程科学技术，在工业、农业、国防和社会经济等各个领域采用计算机控制技术是现代化的重要标志。计算机控制系统一般是指由计算机承担自动控制系统中控制器的任务的一类自动化系统。计算机控制系统所涉及的内容非常广泛，具有明显的多学科综合的特点。

本书共12章。第1章概述计算机控制系统的组成、分类与特点，计算机控制系统的发展状况。第2章介绍计算机控制系统的数学描述与分析方法。首先介绍计算机控制系统中的信号变换过程与原则，然后系统地建立计算机控制系统的数学模型，并根据系统的数学模型，对计算机控制系统在稳定性、准确性、快速性三个方面的特性进行分析，建立计算机控制系统特性或性能指标与系统数学模型的结构及其参数之间的定性和定量关系，用以指导计算机控制系统的设计。第3章~第6章讨论有关数字控制器设计问题。第3章主要针对调节系统，讨论模拟化设计方法——数字PID控制算法。第4章主要针对随动系统，讲述离散化设计方法——最少拍系统设计与一些改进算法。第5章主要针对多输入—多输出系统，讨论状态空间设计法中的极点配置设计法和二次型最优控制。第6章讨论模糊控制。模糊控制建立在人类几千年的历史发展所形成的自然语言基础上，可以使一个系统既有较高的鲁棒性，又有很高的灵敏度。第7章介绍控制系统用计算机的特点和类型。第8章讲述过程通道的设计。第9章讲述组态软件、FCS等现代控制网络技术。第10章讨论电磁兼容技术。第11章阐述计算机系统设计的一般方法。第12章为基础实验指导，其中有针对两个实际对象的控制。每章配合的习题，用于巩固所学知识和应用所学知识进行课题的独立设计。配合部分小型课题设计，来培养学生的创新意识和创造能力。

本书第1~5章由李擎和唐德翠编写，第6~10章由曹荣敏编写，第11、12章由侯明编写，吴细宝编写了全书的习题。本书由北京信息科技大学自动化专业的“自动化国家级特色建设专业”负责人苏中教授主审。

在此向杨树兴教授、苏中教授、侯会文高级工程师及参加原讲义编写的研究生杨磊、夏万林、李浩和郝靖，以及本书所参考的文献的作者表示衷心感谢。

对于本书中存在的错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 概论 1

1.1 计算机控制系统的基本原理与组成 1

1.1.1 计算机控制系统的基本原理 1

1.1.2 计算机控制系统的组成 2

1.2 计算机控制系统的分类 4

1.2.1 按控制方式分类 4

1.2.2 按功能和系统构成分类 5

1.2.3 按控制规律分类 9

1.3 计算机控制系统的发展 9

1.3.1 计算机技术对控制技术的影响 9

1.3.2 计算机控制理论的发展 10

1.3.3 计算机控制系统的发展趋势 12

习题 14

第2章 计算机控制系统的分析 15

2.1 计算机控制系统中信号的变换 15

2.1.1 模数转换与采样定理 15

2.1.2 数模转换与零阶保持器 21

2.1.3 计算机控制系统的简化框图 23

2.2 计算机控制系统的 z 传递函数 24

2.2.1 数字控制器的 z 传递函数 25

2.2.2 连续部分的 z 传递函数 27

2.2.3 闭环 z 传递函数 28

2.3 计算机控制系统的特性分析 29

2.3.1 稳定性 29

2.3.2 稳态误差 35

2.3.3 动态性能 37

习题 42

第3章 数字PID控制器 44

3.1 PID控制算法 44

3.1.1 模拟PID调节器 44

3.1.2 数字PID控制算法 46

3.2 标准PID控制算法的改进 50

3.2.1 “饱和”作用的抑制 50

3.2.2 干扰的抑制 53

3.2.3 给定值突变时对控制量进行阻尼的算法 54

3.2.4 其他修改算法 55

3.3 非线性PID控制器 55

3.3.1 带死区的PID控制 55

3.3.2 时间最优PID控制 56

3.4 数字PID控制器参数的整定 56

3.4.1 整定的基本步骤 57

3.4.2 经验法 57

3.4.3 实验法 58

3.4.4 参数的自整定 59

3.4.5 PID参数寻优 61

3.4.6 采样周期的选择 63

3.5 纯滞后的补偿——Smith预估补偿 64

3.6 PID串级控制 66

3.6.1 串级控制系统的分析 66

3.6.2 数字PID串级控制系统 69

3.6.3 主、副调节器控制规律的选择 70

3.6.4 串级调节器的整定方法 71

3.6.5 副回路微分先行串级控制 71

习题 72

第4章 数字控制器的直接设计方法 74

4.1 数字控制器的直接设计步骤 74

4.2 最少拍有纹波控制器设计 76

4.2.1 由系统的准确性确定 $\Phi(z)$ 77

4.2.2 由系统的快速性确定 $\Phi(z)$ 78

4.2.3 由 $D(z)$ 的物理可实现性确定 $\Phi(z)$ 79

4.2.4 由系统的稳定性确定 $\Phi(z)$ 80

4.3 最少拍无纹波控制器设计 88

4.3.1 纹波产生的原因 88

4.3.2 最少拍无纹波控制器设计方法 89

4.4 惯性因子法 91

4.4.1 有限拍系统的局限性 91

4.4.2 惯性因子法简介 93

4.5 大林算法 95

4.5.1 大林算法的基本形式 95

4.5.2 振铃的强弱及振铃消除方法 96

习题 99

第5章 基于状态空间模型的设计法 101

5.1 控制系统的离散状态空间描述 101

5.1.1 连续系统的精确离散化概述 101

5.1.2 线性系统的离散化 102

5.1.3 一类仿射非线性系统的精确离散化	106	7.1.1 工控机的特点	181
5.1.4 离散系统的解	109	7.1.2 工业控制计算机系统的组成	182
5.2 离散系统的能控性、能观性与稳定性	110	7.1.3 工控机总线介绍	183
5.2.1 离散系统的能控性	110	7.2 可编程控制器	185
5.2.2 离散系统的能观性	111	7.2.1 PLC 的基本组成	185
5.2.3 稳定性分析	112	7.2.2 PLC 的工作原理	186
5.3 极点配置设计法	118	7.2.3 PLC 控制系统	187
5.3.1 基于极点配置的状态反馈控制规律设计	118	7.3 单片机	188
5.3.2 基于极点配置的观测器设计	123	7.3.1 单片机控制系统	188
5.3.3 基于极点配置的控制器的设计	127	7.3.2 ATME151 系列单片机简介	191
5.4 线性二次型最优控制	131	7.4 ARM 处理器	192
5.4.1 LQR 问题的描述	131	7.4.1 ARM 处理器概述	193
5.4.2 二次型性能指标函数的离散化	132	7.4.2 ARM 体系结构	193
5.4.3 LQR 最优控制规律的计算	133	7.4.3 三星 S3C44B0X 处理器简介	194
5.4.4 LQR 与 Liapunov 最优状态反馈设计的关系	137	7.5 数字信号处理器	195
5.4.5 LQ 设计与极点配置设计的比较	138	7.5.1 DSP 芯片概述	195
习题	138	7.5.2 DSP 芯片的基本结构	195
第 6 章 模糊控制	140	7.5.3 TMS320C2000 系列 DSP 简介	196
6.1 模糊控制的数学基础	141	习题	198
6.1.1 模糊集合	142	第 8 章 过程通道	199
6.1.2 模糊关系与模糊矩阵	148	8.1 过程通道的作用	199
6.1.3 模糊逻辑与模糊推理	150	8.2 模拟量输出通道	199
6.2 模糊控制系统	155	8.2.1 模拟量输出通道的结构形式	199
6.2.1 模糊控制的基本原理	155	8.2.2 D/A 转换器	200
6.2.2 模糊控制系统的分类	162	8.3 模拟量输入通道	203
6.2.3 模糊控制器设计的基本方法	163	8.3.1 信号处理器	203
6.3 从实例中看模糊控制	166	8.3.2 多路转换器(多路开关)	204
6.3.1 基于 Mamdani 模糊推理的温度和压力过程控制	166	8.3.3 放大器	204
6.3.2 洗衣机洗涤时间的自动调节设计	167	8.3.4 采样保持器	205
6.3.3 模糊自适应整定 PID 控制	172	8.3.5 A/D 转换器	207
6.3.4 基于 Sugeno 模糊推理的倒立摆模糊控制	176	8.4 开关量(数字量)输入输出通道	211
6.4 模糊控制的优点及其所面临的主要任务	179	8.4.1 数字量输入调理	212
习题	180	8.4.2 数字量输出调理	214
第 7 章 控制用计算机简介	181	8.5 信号的标度变换	216
7.1 工业控制计算机	181	8.5.1 量程自动转换	216
		8.5.2 线性参数标度变换	220
		8.5.3 非线性参数标度变换	221
		8.6 数字滤波技术	222
		习题	224
		第 9 章 控制网络技术	226
		9.1 控制网络和信息网络的区别	226
		9.2 控制网络的体系结构	227
		9.3 分级递阶控制策略	228
		9.3.1 分解—协调的基本原理	229

9.3.2 多目标最优决策	230	11.2.2 建模和确定控制方法	260
9.4 控制网络配置结构	231	11.2.3 总体方案设计	260
9.4.1 控制网络的硬件体系	231	11.2.4 硬件和软件的具体设计	262
9.4.2 控制网络的组态软件	231	11.2.5 软硬件联调	265
9.5 现场总线技术	234	11.2.6 离线仿真——实验室模拟运行	266
9.5.1 现场总线技术特点	235	11.2.7 现场调试、试运行	266
9.5.2 现场总线的通信标准	235	11.2.8 验收或鉴定——系统性能评估	266
9.5.3 几种有影响的现场总线	236	11.3 计算机控制系统设计实例	267
9.6 基于 Internet 的远程控制	238	11.3.1 啤酒发酵过程计算机控制系统	267
习题	239	11.3.2 高精度位置伺服系统	270
第 10 章 计算机控制系统的电磁兼容技术	240	11.3.3 双轮自平衡车控制系统	275
10.1 电磁兼容概述	240	第 12 章 实验	279
10.1.1 干扰源及其作用形式	241	12.1 实验装置介绍及基本实验方法	279
10.1.2 干扰的传播途径	242	12.1.1 实验装置的基本结构及硬件资源	279
10.2 电磁干扰抑制技术	244	12.1.2 虚拟示波器的使用	280
10.2.1 滤波	244	12.1.3 编程软件的基本操作	280
10.2.2 屏蔽	246	12.2 计算机控制系统的典型实验	281
10.2.3 接地	248	12.2.1 A/D、D/A 转换实验	281
10.2.4 隔离	251	12.2.2 数字滤波器实验	282
10.2.5 供电技术	252	12.2.3 积分分离数字 PID 控制	283
10.3 信号的长线传输	253	12.2.4 状态反馈与状态观测器	284
10.3.1 串扰噪声	253	12.2.5 大林算法实验	285
10.3.2 信号反射	255	12.2.6 模糊控制实验	286
习题	256	12.2.7 冷热箱控制实验	286
第 11 章 计算机控制系统设计	257	12.2.8 风扇调速实验	287
11.1 计算机控制系统设计的基本要求和特点	257	附录 常用函数的拉氏变换和 z 变换表	289
11.1.1 系统设计的基本要求	257	参考文献	290
11.1.2 系统设计的特点	259		
11.2 系统设计的一般步骤	259		
11.2.1 确定任务	260		

第 1 章 概 论

计算机控制系统是自动控制理论、计算机技术与通信技术结合发展的产物。采样理论为计算机控制系统奠定了理论基础，计算机技术为先进控制规律的实现提供了非常有效的手段，微电子技术的发展给计算机控制系统的工程化应用和发展提供了物质基础。

1.1 计算机控制系统的基本原理与组成

1.1.1 计算机控制系统的基本原理

数字计算机（简称计算机）在自动控制中的基本应用就是直接参与控制，承担控制系统中控制器的任务，从而形成计算机控制系统。

模拟控制系统（连续控制系统）的基本原理如图 1-1 所示。

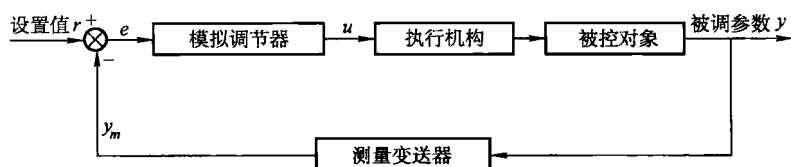


图 1-1 单回路模拟控制系统示意图

计算机控制系统的基本原理如图 1-2 所示，计算机承担控制系统中控制器（调节器）的任务。此控制器包括计算机硬件和软件，不同于模拟控制器构成的系统只由硬件组成。

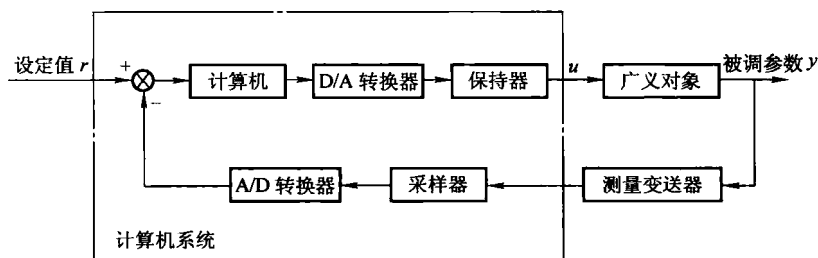


图 1-2 单回路计算机控制系统示意图

1. 计算机控制系统的主要特点

1) 能有效地克服随机扰动。系统运行过程中，多数扰动是难以预知的，因此模拟调节器很难保证控制质量。计算机参与控制后，可根据实时检测到的数据，用自动校正算法估计过程状态，进而自动调整控制信号，保证在扰动出现时仍能达到满意的控制效果。

2) 数字信号的传递可以有效地抑制噪声，从而提高了系统的抗扰能力。

3) 由数字计算机构成的数字控制器，控制规律由软件实现，因此，通常不需要改动硬件，

只要修改程序，就可以适应新的控制要求。

4) 可用一台计算机分时控制若干个回路或系统，提高设备的利用率，经济性好。

5) 控制与管理结合，实现企业综合自动化。特别是计算机通信技术的发展，从收集商品信息、情报资料、制定企业战略计划和生产计划、控制生产过程、生产调度、仓库管理到产品销售都实现微机化，使得工厂的自动化程度进一步提高。

2. 计算机控制系统的工作步骤

计算机控制系统完成控制任务的一个循环可归纳为以下步骤：

1) 实时检测（数据采集）。对被控制量的瞬时值进行检测，并且将采样结果输入到计算机。

2) 实时决策。对输入的实时给定值与被控量的数值进行处理后，按照预先规定的控制规律进行运算，决定下一步的控制过程。

3) 实时控制。根据决策，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，信息共享和管理也介入到控制系统之中。

上述测、算、控、管的过程不断重复，使整个系统能按一定的动态（过渡过程）指标进行工作，且可对被控制量和设备本身所出现的异常状态及时进行监督并迅速做出处理，这就是计算机控制系统最基本的功能。

3. 几个术语的含义

(1) 实时

所谓“实时”，是指信号的输入、计算和输出都是在一定的时间范围内完成的，超出了这个时间就会失去控制时机，控制也就失去了意义。“一定的时间范围”的基本含义是指系统的一个采样周期，“实时”就是指本次采样的计算结果输出须在下一个采样时刻到来之前完成。

实时控制的概念与工艺要求紧密相连，如快速变化的压力对象的实时控制时间要比缓慢变化的温度对象的实时控制时间短。实时控制的性能通常受一次仪表的传输延迟、控制算法的复杂程度、微处理器的运算速度和控制量输出的延迟等因素的影响。

(2) 在线

在计算机控制系统中，如果生产过程设备直接与计算机连接，生产过程直接受计算机的控制，就称为“联机”方式或“在线”方式。

(3) 离线

若生产过程设备不直接与计算机相连接，其工作不直接受计算机的控制，而是通过中间记录介质，靠人进行联系并作相应操作的方式，则称为“脱机”方式或“离线”方式。

1.1.2 计算机控制系统的组成

计算机控制系统中可以有各种规模的计算机，如从微型到大型的通用或专用计算机，但一般是指微型计算机（微机）控制系统。计算机控制系统由计算机系统、受控对象、检测装置和执行机构等组成。用计算机（软件）实现控制规律及其控制算法。计算机与被控对象的联系和部件间的联系，可以有有线方式，如通过电缆的模拟信号或数字信号进行联系；也可以是无无线方式，如用红外线、微波、无线电波、光波等进行联系。被控对象的范围很广，包括各行各业的生产过程、机械装置、交通工具、机器人、实验装置、仪器仪表、家庭生活设施、家用电器和玩具等。

计算机控制系统中的计算机应是广义的，可以是工业控制计算机 [Industrial Control Computer、Process Computer，英文缩写 IPC（工业个人计算机）]、嵌入式计算机（Embedded Computer、ARM）、可编程序控制器 [Programmable Controller，为避免与 PC（个人计算机）相混淆，英文缩写习惯采用 PLC]、单片机（Single Chip Microcomputer 或 Single Chip Microcontroller、Single-chip

Computer)、数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 等。

计算机控制系统包括硬件设备、控制软件和通信网络三大部分。硬件是指计算机本身及其外部设备；软件是管理计算机的程序以及过程控制的应用程序；通信网络则负责各个独立的数据采集节点和控制单元之间的数据信息交换，以及各个控制回路之间和网络之间的信息交换。

1. 计算机控制系统的硬件组成

计算机控制系统的硬件由主机、过程通道、外部设备（包括操作台）、通信接口、检测与执行机构等组成，如图 1-3 所示。

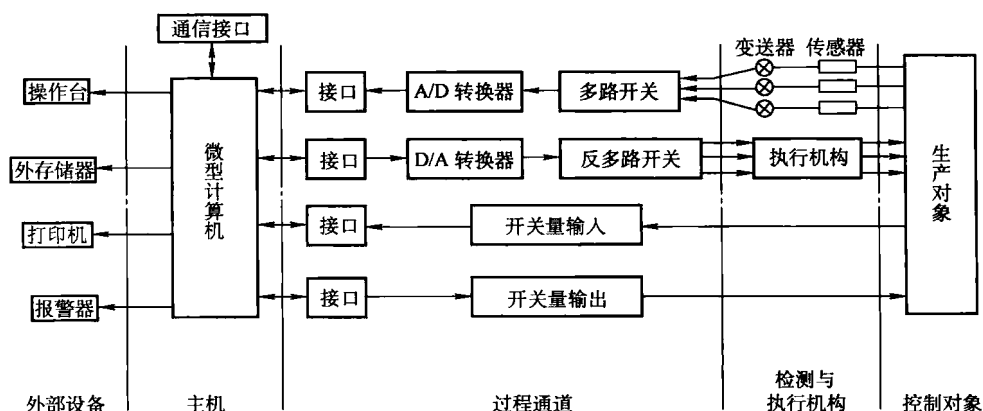


图 1-3 计算机控制系统原理图

(1) 主机

主机的主要功能是按控制规律进行各种控制运算（如调节规律运算、最优化计算等）和操作，根据运算结果作出控制决策；对生产过程进行监督，使之处于最优工作状态；对事故进行预测和报警；编制生产技术报告，制表等。

(2) 过程通道

过程通道是微机和生产对象之间进行信息交换的桥梁和纽带。过程通道包括输入通道和输出通道。输入通道把生产对象的被控参数转换成微机可以接收的数字代码。输出通道把微机输出的控制命令和数据转换成可以对生产对象进行控制的信号。

过程通道按功能和传递数据的方式，可分为：并行接口、串行接口、DMA、实时时钟；模拟量输入（AI）通道、模拟量输出（AO）通道、开关量（数字量）输入（DI）通道、开关量（数字量）输出（DO）通道、视频语音等处理设备。

(3) 外部设备

外部设备（简称外设）实现微机和外界的信息交换，包括操作台（控制台）、打印机、外存储器等。其中操作台是微机控制系统中的重要设备——人机联系设备。

操作台具备显示功能，即根据操作人员的要求，能立即显示所要求的内容，如被控系统的流程总图、开关状态图、时序图、变量变化趋势图、调节回路指示图、索引等。操作台有数据键或触摸屏，用于送入数据或修改控制系统的参数；有功能开关和按钮，完成系统的启、停等功能。操作台还要保证即使操作错误也不会造成恶劣后果，即应有自保护功能。

(4) 检测与执行机构

在控制系统中，为了收集和测量各种参数，采用了各种检测元件及变送器，其主要功能是将被检测参数的非电量转换成电量。例如，热电偶把温度转换成电压（mV）信号，压力变送器可

以把压力转换成电信号。这些信号经变送器转换成统一的标准信号（0~5V 或 4~20mA）后，再通过过程通道送入计算机。现代智能检测元件或装置的输出信号可直接送入计算机。

执行机构的功能是根据微机输出的控制信号，改变输出的角位移或直线位移，并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。

2. 计算机控制系统的软件组成

软件是指完成各种功能的计算机程序的总和。从功能上讲，计算机控制系统的软件包括系统软件和应用软件。系统软件通常由计算机制造厂为用户配套，有一定的通用性。应用软件是为实现特定控制目的而编制的专用程序，如数据采集程序、控制决策程序、输出处理程序和报警处理程序等，它们涉及被控对象的自身特征和控制策略等，由管理控制系统的专业人员自行编制。

(1) 系统软件

1) 操作系统：管理程序、磁盘操作系统程序、监控程序等。

2) 诊断系统：调节程序、故障诊断与修复程序。

3) 程序设计系统：各种程序设计语言、语言处理程序（编译程序）、服务程序（装配程序和编辑程序）、模拟主系统（系统模拟、仿真、移植软件）、数据管理系统等。

4) 信息处理：文字翻译、企业管理等。

5) 通信网络软件。

(2) 应用软件

1) 过程监视程序：巡回检测程序、数据处理程序、上下限检查及报警程序、操作台服务程序等。

2) 过程控制计算程序：各种控制算法程序、数字滤波及标度变换程序、判断程序、过程分析程序、事故处理程序。

3) 各种过程通道接口程序。

4) 公共服务程序：基本运算程序、函数运算程序、数码转换程序、格式编码程序、信息管理程序。其中信息管理程序包括信息生成调度、文件管理及输出、打印、显示程序等。

5) 数据库：历史数据库和实时数据库。

1.2 计算机控制系统的分类

1.2.1 按控制方式分类

计算机控制系统按控制方式分为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

被控量（输出）不影响系统控制的控制方式称为开环控制。所以在开环控制中，在输出端和输入端之间不存在反馈联系，如图 1-4 所示。这种控制方式的特点是，在给定输入端到输出端之间的信号传递是单向进行的。这种控制方式的缺点是，当被控对象或控制装置受到干扰，或者在工作过程中元件特性发生变化而影响被控量时，系统不能进行自动补偿，被控制精度难以保证。但是由于它的结构比较简单，所以在控制精度要求不高或者元件工作特性比较稳定而干扰又很小的场合应用比较广泛。

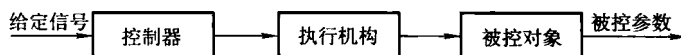


图 1-4 用给定信号操作的开环控制系统

2. 闭环控制系统

被控量参与系统控制的控制方式称为闭环控制。闭环控制的原理如图 1-5 所示。由图可见, 在闭环控制中, 在给定量和被控量之间, 除了有一条从给定量到被控量方向传递信号的前向通道外, 还有一条从被控量到比较元件传递信号的反馈通道。控制信号沿着前向通道和反馈通道循环传递, 故闭环控制又称为反馈控制。

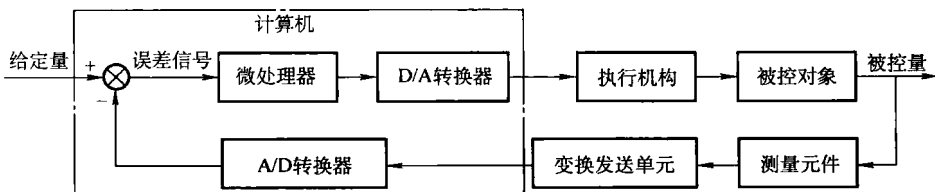


图 1-5 闭环计算机控制系统

在闭环控制中, 被控量时时刻刻被检测, 再经过信号变换, 并通过反馈通道与给定量进行比较。比较后得到的偏差信号经计算机处理后送入执行机构。执行机构根据所接收的信号的大小和极性, 对被控对象进行调节, 以进一步减小偏差。

可见, 只要出现偏差, 而不论该偏差是干扰造成的, 还是由于系统元件或受控对象工作特性变化所引起的, 系统都能自行调节以减小偏差。故闭环控制系统又称为按照偏差调节的控制系统。

闭环控制从原理上提供了实现高精度控制的可能性, 它对控制元件的要求比开环控制的低, 但与开环控制系统相比, 闭环控制系统成本较高。闭环控制是自动控制中广泛采用的一种控制方式。

1.2.2 按功能和系统构成分类

从应用功能、控制目的和系统构成方面出发, 计算机控制系统分为: 监视控制与数据采集系统 (操作指导控制系统)、直接数字控制系统、计算机监督控制系统、控制网络 (集散控制系统、现场总线控制系统和计算机集成制造系统等)。

1. 监视控制与数据采集系统

监视控制与数据采集系统 (Supervisory Control and Data Acquisition System, SC&DAS) 主要是采集生产过程或各种检测装置的参数, 并对参数进行处理, 进行参数的超限报警, 或者按要求定时制表、打印或将数据处理的结果记录在外存储器中, 作为资料保存和供分析使用。

监视控制与数据采集系统也由于常常用于开环控制系统中起操作指导作用而称为操作指导控制系统, 其原理框图如图 1-6 所示。在操作指导控制系统中, 计算机的输出不直接作用于生产对象, 属于开环控制结构。计算机根据数学模型、控制算法对检测到的生产过程参数进行处理, 计算出各控制量应有的较合适或最优的数值, 供操作员参考, 这时计算机就起到了操作指导的作用。操作指导控制系统的优点是结构简单和控制灵活; 缺点是要由人工进行操作, 操作速度受到了人为的限制, 并且不能同时控制多个回路。该系统常用在计算机控制系统设计与调试阶段, 进行数据检测、处理及试验新的数学模型, 调试新的控制程序等。

2. 直接数字控制系统

直接数字控制系统 (Direct Digital Control System, DDCS) 是计算机在工业应用中最普遍和最基本的一种方式。DDCS 中的计算机完全取代模拟调节器, 参加闭环控制过程, 同图 1-3 所示。它用一台微机对多个被控参数进行巡回检测, 将检测结果与设定值进行比较, 再根据规定的 PID

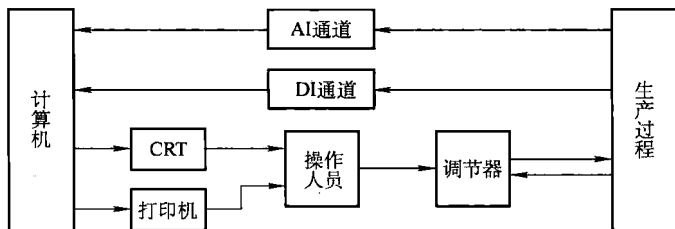


图 1-6 操作指导控制系统原理框图

规律、模糊逻辑规律或其他控制规律进行运算，最后输出到执行机构对生产过程进行控制，使被控参数稳定在给定值上。一般的直接数字控制系统有一个功能齐全的运行操作台，系统的给定、显示、报警等集中在此操作台上。

DDCS 的优点：①控制灵活。在常规模拟调节器控制系统中，控制器一经选定，其控制方法也就确定了，要改变控制方法就必须改变硬件，这往往难度较大。而在 DDCS 中，由于微机代替了常规模拟调节器，因此要改变控制方法，只要改变程序就可以实现了，无须对硬件线路作任何改动。②可以有效地实现较复杂的控制，用来改善控制质量，提高经济效益。③当控制回路较多时，采用 DDCS 比采用常规控制器控制系统要经济合算，因为一台微机可代替多个模拟调节器。

DDCS 的缺点：在 DDCS 中，对生产过程产生直接影响的被控参数给定值是预先设定并存储在控制器（计算机）内存中的，这个给定值不能根据过程条件和生产工艺信息的变化及时修改。

3. 计算机监督控制系统

计算机监督控制系统（Supervisory Computer Control System, SCCS）是 2 级控制系统：第 1 级为监督控制；第 2 级为直接控制，如图 1-7 所示。SCCS 中的监督计算机由于承担上一级控制与管理任务，要求其数据处理功能强，存储容量大。

SCCS 中，由监督计算机根据工艺数据（生产过程工况）和已设定的描述生产过程的数学模型，按照某一目标函数进行优化分析，自动产生最优设定值作为控制器的给定值，再由直接控制系统执行。从这个角度上说，它的作用是改变给定值，所以又称为给定值控制（Set Point Computer Control, SPC）。

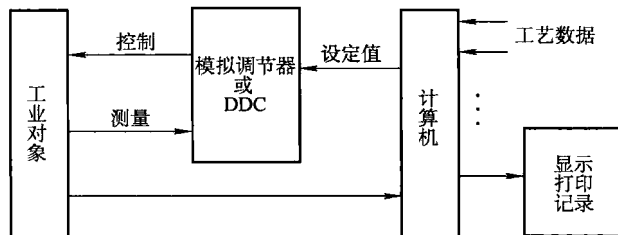


图 1-7 SCCS 原理框图

SCCS 比 DDCS 更接近生产变化的实际情况，因为在 DDCS 中计算机只是代替模拟调节器进行控制，系统不能运行在最佳状态，而 SCCS 不仅可以进行给定值控制，并且还可以进行顺序控制、最优控制以及自适应控制等，它是操作指导控制系统和 DDCS 的综合与发展。

从图 1-7 所示的 SCCS 原理框图可以看出，就其结构来讲，SCCS 有两种形式：一种是 SCC + 模拟调节器系统，另一种是 SCC + DDC 系统。SCC + 模拟调节器这种系统特别适合老企业的技术改造，以便能够充分利用原有的模拟调节器。

4. 控制网络

控制网络是多级分布式网络系统，其理念是地理和功能上的分布式控制（分散控制）、分层优化管理。本书将人们常言的集散控制系统、现场总线控制系统、工业以太网控制系统和计算机集成制造系统等均归入控制网络。它具有以下特点：

1) 金字塔结构。控制网络系统体系结构为金字塔结构,由上到下,一般是:上层,即管理层,负责信息管理和静态优化;中间层,即监控层,负责生产过程的监控及动态优化;底层,即直接控制层,负责现场控制与检测。

2) 可靠性高。以多台微处理器分散在生产现场,进行过程的测量和控制,实现了功能和地理上的分散控制,避免了测量和控制高度集中带来的危险性,使每台微机的任务相应减少,功能更明确,组成也更简单,因此提高了可靠性。

3) 设计、开发、维护、操作方便。由于系统底层采用模块式结构,且具有自诊断和错误检测系统,所以设计、开发及维护都很方便,并能实现高级复杂规律控制。监控层和管理层一般执行开放的统一标准,可应用成熟技术。

(1) 集散控制系统

20 世纪 70 年代中期出现的集散控制系统 (Distributed Control System, DCS) 或称为分布式控制系统,由若干台微处理器或微机分别承担部分任务,并通过高速数据通道把各个分散点的信息集中起来,进行集中的监视和操作,并实现复杂的控制和优化。如图 1-8 所示,即采用分散控制和集中管理的控制理念与网络化的控制结构,灵活地将控制设备、服务器、基础自动化单元等联系在一起,克服了常规仪表控制过于分散和人机联系困难的缺点。传统的 DCS 是专用网络系统,各生产厂家的产品不具有兼容性和互联性。但现代 DCS 的底层越来越多地应用现场总线 (Fieldbus) 技术,与 FCS 融为一体。

(2) 现场总线控制系统

现场总线控制系统 (Fieldbus Control System, FCS) 是将现场仪表和控制室仪表连接起来的全数字化、双向、多站的互联通信的控制网络系统。它融合了智能化仪表、计算机网络和开放系统互联 (OSI) 等技术。

现场总线打破了传统的 DCS 的结构模式。传统的 DCS 采用一对一的设备连线,按控制回路分别进行连接,位于现场的测量变送器与位于控制室的控制器之间,控制器与位于现场的

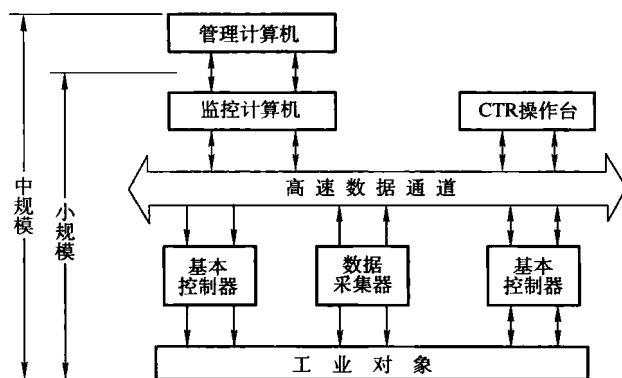


图 1-8 DCS 原理框图

执行器之间均为一对一的物理连接。而现场总线由于采用了智能现场设备,能够把原先 DCS 中处于中央控制室的控制模块、输入输出模块内置到现场设备,加上现场设备具有通信能力,现场的测量变送仪表可以与阀门、开关等执行机构直接传送信号,因而控制系统功能能够不依赖控制室的主控计算机或控制仪表而直接在现场完成,实现了彻底的分散控制,使控制实时性和系统可靠性大大提高。图 1-9 为 FCS 与传统的 DCS 的比较示意图。

(3) 工业以太网控制系统

以太网 (Ethernet) 及 TCP/IP 通信技术在 IT 行业获得了很大的成功,成为 IT 行业应用中首选的网络通信技术。近年来,以太网及 TCP/IP 技术逐步在自动化行业中得到应用,一方面工厂自动化技术与 IT 技术、互联网 (Internet) 技术结合,成为未来可能的制造业电子商务技术、网络制造技术的雏形;另一方面,以太网在工业过程控制底层,也就是设备层或称为现场层可望广泛应用,成为统一的工业网络标准——工业以太网。图 1-10 为研华 (Advantech) 公司提供的工业以太网控制系统方案,其中包括:

1) Modbus/RTU 应用技术。

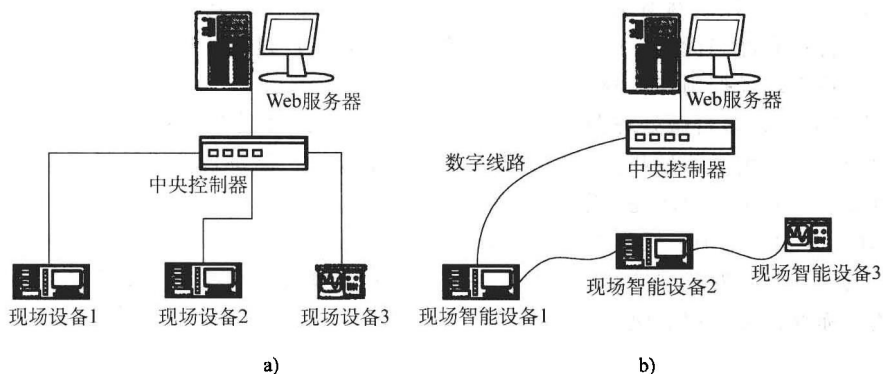


图 1-9 现场总线控制系统和传统控制系统结构比较

a) 传统的 DCS b) FCS

- 2) Modbus/TCP 应用技术。
- 3) GSM，包括 SMS（短消息服务）技术。
- 4) 工业以太网视频传输控制技术。
- 5) 工业无线以太网技术。
- 6) RS—485-工业以太网转换技术。
- 7) 实时监控、人机交互（HMI）技术。
- 8) Web 发布功能。

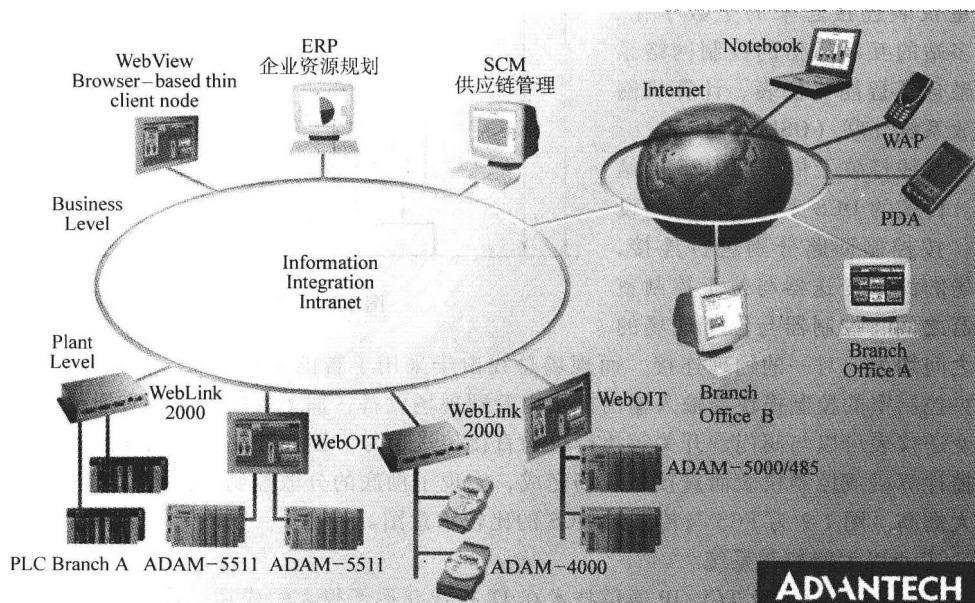


图 1-10 工业以太网（Advantech 公司提供）

(4) 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacture System, CIMS）是通过分布式数据库、网络通信和自动化系统的环境支持下将产品设计、产品制造及信息管理三个功能集成在一起的新型分布式控制系统。它是以经济指标为目标，进行在线成本的预测、控制和反馈校正，以形成生

产成本控制中心，保证生产过程的优化运行；实施生产全过程的优化调度、统一指挥，以形成生产指挥中心，保证生产过程的优化控制；进行生产过程的质量跟踪、安全监控，以形成质量管理体系和设备保证体系，保证生产过程的优化管理。CIMS是一个多层次递阶的集成系统，通常分为ERP/MES/PCS/三层模型结构，如图1-11所示。底层为生产过程控制系统（Process Control System, PCS），包括DCS、FCS、DDC和APC等。第二层为考虑企业层面经营管理问题的企业资源计划（Enterprise Resource Planning, ERP）系统，当前一些自动化公司推出的ERP基本功能包括物料管理、生产规划、财务、销售、企业情报管理等，有些ERP还具备一些扩展功能，如供应链管理、顾客关系管理以及电子商务等。第三层为生产执行系统（Manufacturing Execution System, MES）又称为制造执行系统，是处于计划层与控制层之间的执行层，起到对由生产过程产生的信息以及由经营管理和生产管理活动中产生的信息进行转换、加工、传递的作用，是生产活动与管理活动信息集成的重要桥梁和纽带。它主要包括生产过程模型化、生产过程管理、生产过程支持、基于工艺目标与技术经济指标的过程优化、先进控制、控制接口与信息界面、实时调度、质量管理、安全控制与管理、运行操作支持、设备维护管理、生产流程可视化模拟和资产动态管理等功能。

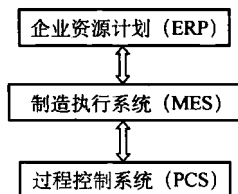


图 1-11 CIMS 结构

1.2.3 按控制规律分类

程序控制和顺序控制：程序控制是指被控量按照预先规定的时间函数变化，被控制量是时间的函数，如加热炉炉温按着一定的时间曲线进行控制；顺序控制是指在各个时期所给出的设定值可以是不同的物理量，而且每次设定值的给出，不仅取决于时间，还取决于事件，以及对以前的控制结果的逻辑判断。

经典控制规律：比例积分微分控制（PID 控制）、串级控制、前馈控制、有限拍控制等。

现代控制规律：最优控制、自适应控制、变结构控制、鲁棒控制、预测控制等。

智能控制规律：模糊控制、专家控制、人工神经元和遗传算法等。

1.3 计算机控制系统的发展

1.3.1 计算机技术对控制技术的影响

计算机控制的发展同计算机本身的发展有着紧密的联系，计算机每更新换代一次，计算机控制就前进一步，上一个新台阶。随着计算机的发展，计算机控制系统大约分为以下几个时期：1955 年前后为试验阶段；1962 年前后为直接数字控制（DDC）时期；1967 年前后为小型机时期；1972 年前后为微型机时期；1980 年前后为数字控制的广泛应用时期；1990 年开始为集散控制时期。

世界上第一台电子计算机于 1946 年问世后不久，人们就萌生了将计算机用于导弹和飞机的控制计算，但当时的计算机体积大、功耗大、可靠性差，不能用于实际控制系统。因此，在之后较长的一段时间里，计算机主要用于科学计算和数据处理。后来计算机控制的发展主要是在工业过程控制领域中获得。

20 世纪 50 年代中期，美国科技人员开始进行化工过程计算机控制系统的可行性研究，1959 年 3 月，世界上第一个规模较大的过程计算机控制系统在德克萨斯州的一个炼油厂正式投入运行，并取得成功。该系统控制包括 26 个流量、72 个温度、3 个压力和 3 个成分。控制的主要目的是使反应器的压力最小，确定反应器进料量的最优分配，并根据催化作用控制热水流量以及确

定最优循环。1962年英国的一个乙烯工厂成功实现了直接数字控制（DDC）系统，其中数据采集点为244个，并控制129个阀门。计算机的成功应用，使计算机厂家看到了新的市场，使工业界看到了新的自动化工具，使学术界发现了新的研究课题，因而有力地推动了计算机控制和计算机本身的进一步发展。

1965~1969年是计算机控制进入实用的阶段。由于小型计算机的出现，使其可靠性不断提高，成本逐年下降，计算机在生产控制中的应用得到迅速的发展。但这个阶段仍然主要是集中型的计算机控制系统。

计算机控制的普及和大发展是从20世纪70年代初出现微型计算机开始的。微型计算机的低成本使得大量推广分级控制，将计算机分散到生产装置中去成为现实。1975年世界上几个主要计算机和仪表公司，如美国的Honeywell公司、日本的横河公司等几乎同时推出了各自的DCS产品，并都得到广泛的工业应用。而我国计算机控制应用起步较晚，是从20世纪70年代末DCS兴起才开始的，从这时起，一些石化、冶金、电力等大型企业陆续引进了一批DCS产品，用于大型生产过程控制，这不仅大大提高了我国大型生产过程的自动化水平，而且也为我国计算机控制推广应用发挥了重要的示范和借鉴作用，有力地推动了我国计算机控制技术的发展。

20世纪80年代中、后期推出了将DCS低层控制级的现场控制器和智能化仪表设备用现场总线互连构成的新型分散控制系统——现场总线控制系统。

20世纪90年代以后，随着现场总线控制技术的逐渐成熟、以太网技术的逐步普及、智能化与功能自治性的现场设备的广泛应用，使嵌入式控制器、智能现场测控仪表和传感器方便地接入现场总线和工业以太网，直至与Internet相连。

1.3.2 计算机控制理论的发展

计算机控制的发展不仅同计算机技术发展的关系密切，而且与控制理论的应用与发展也有密切的关系。

在计算机控制系统中，目前主要应用采样系统理论。采样系统理论发展的一些主要思想，大都是连续时间系统思想的扩展。

1. 采样定理

因为所有的计算机控制系统都是根据过程变量在离散时刻的值来工作的，那么，对于一个连续信号，以多高的速率对其采样，所得到的离散值能够反映出被采样的连续信号的何种特性，弄清楚这个问题是很重要的。奈奎斯特（Nyquist）最早探讨了其关键问题，他证明了要想把正弦信号从它的采样值复现出来，就必须对正弦信号每周期内至少采样两次。1949年香农（Shannon）在香农采样定理中完全解决了这个问题，为理解离散时间系统所产生的某些现象提供了基础。

2. 差分方程

采样系统理论的最初起源与某些特殊控制系统的分析有关。奥尔登伯格（Oldenburg）及萨托里厄斯（Sartorius）于1948年对落弓式检流计的特性所作的研究，就是对采样系统理论做出的最早贡献之一。已证明，用差分方程代替连续系统理论中的微分方程，通过分析一个线性时不变差分方程可以理解系统的许多特性，如系统的稳定性分析和研究等。采样数据分析理论与数值分析密切相关，积分可用数值求和来近似计算。许多优化问题都能够用差分方程来描述，普通微分方程就是通过差分方程来近似积分的。例如，数值积分算法中的步长调整就可以视为一个采样数据控制问题。

3. 变换方法

在第二次世界大战期间和战后时期，许多研究致力于雷达系统分析。因为雷达天线每旋转一