



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI
XINXILEI

计算机 控制技术的应用

■ 王平 谢昊飞 蒋建春 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

免费
电子课件

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

计算机控制技术及应用

王平 谢昊飞 蒋建春 等编著



机械工业出版社

本书通过总结作者的科研成果和吸收国内外的先进理论、方法和技术,以计算机控制系统的网络化、开放化、智能化和集成化发展趋势为主线,主要介绍计算机控制系统的基本概念和计算机控制系统的典型形式,计算机控制系统的数学描述与基本分析方法,以及数字 PID 控制器、最少拍控制系统、达林算法、状态变量设计法等设计方法及其各种改进算法。重点突出计算机控制系统输入输出通道接口的设计方法和典型控制系统的设计案例与实现方法等。本书注重运用 CDIO 工程教育理念,立足培养实际动手能力、综合应用能力、创新思维能力。每章均附有精选的习题。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。

本书可作为普通高等院校控制科学类、电子信息类、电气工程类、仪器仪表类、机械电子类及其相关专业的本科生、研究生及教师的教科书和教学参考书,也可作为广大科技工作者和工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机控制技术及应用/王平等编著. —北京:机械工业出版社, 2010.1

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-29504-4

I. 计… II. 王… III. 计算机控制 - 高等学校 - 教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 003146 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:王保家 责任编辑:王保家 版式设计:霍永明

封面设计:张静 责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.5 印张 · 457 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-29504-4

定价: 31.00 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

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是作者在重庆邮电大学自动化学院多年从事教学、科研的基础上，经多次试用，反复修改提高而成。本教材将有关教学和科研成果加以总结提高，并吸收了近年来本学科发展的理论、方法和技术，注重运用 CDIO 工程教育理念，立足培养实际动手能力、综合应用能力、创新思维能力。

本教材注重知识内容的系统性、先进性与实践性，强调课程教学与社会需求的无缝连接、授人以“渔”。既注重对学生基础知识的培养，也注意让学生了解本课程的最新技术发展动态；既注重理论知识的系统性、实用性，也强调实践内容的应用性、工程性。为此，教材中大量选用了取自于作者所在团队的最新科技成果、指导学生参加科技竞赛的国家级获奖作品、用于学生实践的中药萃取多总线集成控制系统工程实训项目作为实例。

本教材共分 7 章，各章节介绍如下

第 1 章是绪论，主要介绍计算机控制的基本概念、发展历程与趋势、计算机控制技术的知识体系结构。

第 2 章是计算机控制的数学基础，主要包括采样与保持的原理与基本概念、物理意义，开环脉冲传递函数、闭环脉冲传递函数的基本概念与计算方法以及采样系统的动态分析方法及其稳定性条件。

第 3 章主要讨论计算机控制系统的常规设计方法，包括模拟控制器的离散化方法，数字 PID 控制器、最少拍控制系统及各种改进算法、达林算法等，重点介绍计算机控制中的控制方法与软件。

第 4 章主要探讨高级数字控制器的分析与设计方法，包括数字控制器状态变量分析理论基础、控制系统的能控性与能观测性、状态反馈极点配置控制系统的设计方法、状态观测器的设计方法和具有状态观测器的控制系统设计等内容。

第 5 章重点介绍计算机控制中的数据输入输出通道接口技术，包括数据输入输出通道的组成与功能、多路开关及采样保持器、开关量输出通道设计、开关量输入通道设计、模拟量输出通道设计、模拟量输入通道设计、人机交互接口设计等内容。介绍的数据输入输出通道接口可直接作为学生的实验开发项目。

第 6 章结合计算机控制技术的结构网络化、控制分散化、节点智能化、系统集成化发展趋势，介绍了集散控制系统、主要现场总线与工业以太网的基本内容。素材均来自作者参加 IEC SC/65C 相关标准和 EPA 标准制定的成果，以及重庆邮电大学实训中心的工程实训系统。

第 7 章重点是以实际例子说明计算机控制系统的设计方法与实现技术。其中多通道温度采集系统重点介绍基于 ARM 单片机的数据通道接口与人机交互接口设计方法与实现技术；智能小车控制系统重点介绍多传感器数据通道接口、多执行机构控制数据通道接口及 PID 控制的设计方法与实现技术；中药萃取控制系统重点介绍多总线集成的网络化控制系统设计方法与实现技术。多通道温度采集系统可作为学生的实验开发项目；智能小车控制系统可作为

学生的创新实验项目；中药萃取控制系统可作为学生的工程实训项目。

本教材第1章、第2章由王平教授编写，并负责全书的统稿；第3章由蒋建春老师编写；第4章由魏旻老师编写；第5章由付蔚老师编写；第6章由谢昊飞老师编写；第7章由王平教授、吕霞付教授、付蔚老师编写。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wbj@cmpbook.com 索取。本书还配有学生实验实践平台及相关的指导书，需要者可与作者联系（wangping@cqupt.edu.cn）。

本书主要适合高等院校的自动化类、测控类、电气类、电子类、计算机应用类及机电一体化类专业作为教材使用，同时也是相关工程技术人员的实用参考书。

鉴于计算机控制学科的飞速发展，尽管编写过程中尽心尽力，但由于作者水平有限，书中不足或缺点在所难免，敬请读者批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自动化技术与信息技术的关系	1
1.2 自动控制系统的基本结构	1
1.3 计算机控制系统基本原理	2
1.4 计算机控制系统的分类	3
1.4.1 按功能及结构分类	3
1.4.2 按控制规律分类	11
1.4.3 按控制方式分类	12
1.5 计算机控制系统的特点	12
1.6 计算机控制系统的性能及其指标	12
1.6.1 性能指标	13
1.6.2 控制对象的特性对控制性能的影响	13
1.7 计算机控制技术的知识体系	14
1.8 计算机控制技术的发展	16
1.8.1 现代计算机技术对控制技术的影响	16
1.8.2 计算机控制技术的发展动向	18
习题 1	19
第 2 章 计算机控制系统的数学描述	20
2.1 计算机控制系统数学描述方法的分类	20
2.2 信号的采样与保持	21
2.2.1 信号的分类	21
2.2.2 连续信号的采样	22
2.2.3 采样定理	25
2.2.4 信号复现与零阶保持器	27
2.3 采样系统的数学描述	30
2.3.1 脉冲传递函数的定义	30
2.3.2 开环系统脉冲传递函数	31
2.3.3 闭环系统的脉冲传递函数	35
2.4 采样系统的动态响应	37
2.5 采样系统的稳定性	39
2.6 采样系统的稳态分析	41

习题 2	43
------------	----

第 3 章 常规数字控制器的设计方法	45
3.1 数字控制器的设计方法分类	45
3.2 数字 PID 控制	46
3.2.1 理想微分 PID 控制	46
3.2.2 实际微分 PID 控制	49
3.2.3 数字 PID 调节器的参数整定	52
3.3 最少拍数字控制系统	56
3.3.1 最少拍数字控制系统的设计	56
3.3.2 最少拍无纹波控制系统设计	65
3.3.3 最少拍控制系统的改进	68
3.4 达林算法	71
3.4.1 达林算法设计	71
3.4.2 振铃现象及其消除方法	73
习题 3	76

第 4 章 高级数字控制器的分析与设计	77
4.1 系统的能控性与能观测性	77
4.1.1 基本概念	77
4.1.2 离散系统的能控性	78
4.1.3 离散系统的可观测性	79
4.1.4 对偶原理	81
4.1.5 坐标变换与标准型	81
4.2 数字控制器状态空间设计法	84
4.2.1 状态反馈极点配置控制系统的设计	85
4.2.2 状态观测器的设计	92
4.2.3 具有状态观测器的极点配置	96
习题 4	100

第 5 章 数据输入输出通道的接口技术	102
5.1 数据输入输出通道的组成与功能	102
5.1.1 数据通道的类型	102
5.1.2 数据通道的信息类型	102

5.1.3 数据通道的编址方式	103	6.1.3 JX-300X 集散控制系统	181
5.1.4 CPU 对数据通道的控制方式	103	6.2 现场总线技术简介	183
5.1.5 数据通道接口设计应考虑的问题	104	6.2.1 现场总线控制系统的演变	183
5.2 多路开关及采样保持器	105	6.2.2 现场总线技术的特点	185
5.2.1 多路开关与多路分配器	105	6.2.3 现场总线标准化	186
5.2.2 采样保持器	110	6.2.4 典型现场总线简介	188
5.3 开关量输出通道	112	6.3 工业以太网技术简介	203
5.3.1 开关量输出通道的结构形式	112	6.3.1 工业以太网标准化进程	203
5.3.2 开关量输出通道与 CPU 的接口	113	6.3.2 IEC 61784-2 标准体系结构	204
5.3.3 功率接口技术	113	6.3.3 IEC 61784-2 中主要标准简介	205
5.4 开关量输入通道	115	6.3.4 IEC 61784-1/2 与 IEC61158	212
5.4.1 开关量输入通道的结构形式	115	习题 6	213
5.4.2 开关量形式及变换	116	第 7 章 计算机控制系统设计与实现 ...	215
5.4.3 整形与电平变换	118	7.1 计算机控制系统的设计方法	215
5.4.4 开关量输入通道与 CPU 的接口	119	7.1.1 计算机控制系统的设计原则	215
5.5 模拟量输出通道	123	7.1.2 计算机控制系统的设计步骤	216
5.5.1 D/A 转换原理	123	7.2 计算机控制系统的实现过程	218
5.5.2 D/A 转换器的选用	126	7.2.1 计算机控制系统的可行性论证	218
5.5.3 8 位并行 D/A 转换器及其接口技术	132	7.2.2 计算机控制系统的工程设计	220
5.5.4 高于 8 位的并行 D/A 转换器及其接口技术	138	7.3 控制系统中的可靠性技术	225
5.5.5 串行 D/A 转换器及其接口技术	142	7.3.1 冗余结构技术	225
5.6 模拟量输入通道	144	7.3.2 控制系统的抗干扰措施	226
5.6.1 A/D 转换原理	144	7.3.3 软件设计的可靠性措施	229
5.6.2 A/D 转换器的选用	148	7.3.4 重视安装工艺措施	230
5.6.3 逐次逼近式并行 A/D 转换器及其接口	155	7.4 多通道温度采集系统	230
5.6.4 双积分 A/D 转换器及其接口技术	167	7.4.1 系统方案设计	230
5.6.5 串行 A/D 转换器及其接口技术	171	7.4.2 系统硬件设计	231
习题 5	176	7.4.3 系统软件设计	239
第 6 章 计算机控制网络技术概论	178	7.4.4 系统调试与运行	244
6.1 集散控制系统简介	178	7.5 智能小车控制系统	244
6.1.1 集散控制系统的发展历程	178	7.5.1 控制方案设计	244
6.1.2 集散控制系统的组成	178	7.5.2 系统硬件设计	246
		7.5.3 系统软件设计	258
		7.5.4 系统调试与运行	268
		7.6 中药萃取控制系统	269
		7.6.1 控制方案设计	269
		7.6.2 系统硬件设计	271
		7.6.3 系统软件设计与组态	275
		7.6.4 系统调试与运行	286
		参考文献	289

第 1 章 绪 论

计算机控制是自动控制理论、自动化技术与计算机技术紧密结合的产物。控制理论的发展，尤其是现代控制理论的发展，与计算机技术息息相关。利用计算机快速强大的数值计算、逻辑判断等信息加工能力，计算机控制系统可以实现常规控制以外更复杂、更全面的控制方案。计算机为现代控制理论的应用提供了有力的工具。同时，计算机控制技术在工业控制领域的应用，又提出来一系列理论与工程上的问题，进一步推动了控制理论和计算机技术的发展。计算机技术在控制领域中的应用，还有力地推动了自动控制技术的发展，大大扩展了控制技术在工业生产中的应用范围，特别是使复杂的、大规模的自动化系统发展到了一个崭新的阶段。

1.1 自动化技术与信息技术的关系

当前，科技界普遍认为，信息技术由 4 大部分组成，即信息获取、信息传输、信息处理与信息应用或信息利用。这 4 部分实际上组成了一个完整的信息链，如图 1-1 所示。

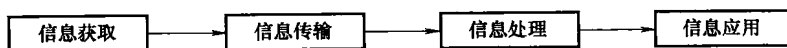


图 1-1 信息技术的四个组成部分及其信息链

一个基本的自动化系统至少包含信息获取、处理与应用 3 部分（如图 1-2 所示），而一个应用计算机网络或通信网络的自动化系统则包含信息获取、传输、处理与应用的全部过程。也就是说，自动化技术涉及到信息技术的全部内容。

虽然自动化技术涉及全部信息技术，但自动化技术的重点是在信息的应用上，信息的获取、传输与处理是为了满足信息应用的需要。自动化技术的作用就是如何有效地利用信息来促进能量与物质的充分利用，从而为现代社会的发展提供物质保证。

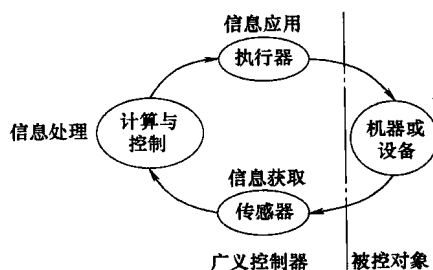


图 1-2 从信息技术角度看基本自动化系统的组成

1.2 自动控制系统的的基本结构

自动控制系统要综合运用信息获取、信息传输、信息处理和系统集成等技术，并考虑人类因素、环境因素的相互作用与影响。虽然说自动化技术涉及到信息技术的全部，但各类信息技术都有自己的研究重点。如，通信技术的重点是信息的传输，计算机技术的重点是信息的处理，而自动化技术的重点则是信息的应用。

一般来说自动控制系统随着控制对象、控制规律、执行机构的不同而具有不同的特点，

总体上可归纳为图 1-3 所示的闭环控制系统与开环控制系统两种基本结构。

在控制系统中为了得到控制信号，要将被控参数与给定值进行比较，然后形成误差信号。控制器根据误差信号进行控制调节，使系统趋向误差减小，最终使误差为零，从而达到使被控参数趋于或等于给定值之目的。在这种控制系统中，被控量是系统的输出，同时被控量又反馈到输入端，与输入量（给定值）相减，所以称为按误差进行控制的闭环控制系统。从图 1-3a 可知，该系统通过测量单元对被控对象的被控参数（如温度、压力、流量、液位、转速、位移等）进行测量，由变换发送单元将被测参数变成一定形式的电信号，反馈给控制器。控制器将反馈回来的信号与给定信号进行比较，若有误差则按预定的控制规律产生一个控制信号驱动执行机构工作，使被控参数与给定值保持一致。

图 1-3b 是开环控制系统。与闭环控制系统不同，它不需要被控对象的反馈信号，控制器直接根据给定值去控制被控对象工作。这种控制系统不能自动消除被控参数与给定值之间的误差，与闭环控制系统相比，其控制性能显然要差很多。

由图 1-3 可见，自动控制系统的的功能是进行信号的传递、加工和比较。这些功能是由测量单元、变换发送单元、控制器和执行机构来完成的。其中控制器是控制系统的关键部分，它决定了控制系统的控制性能和应用范围。

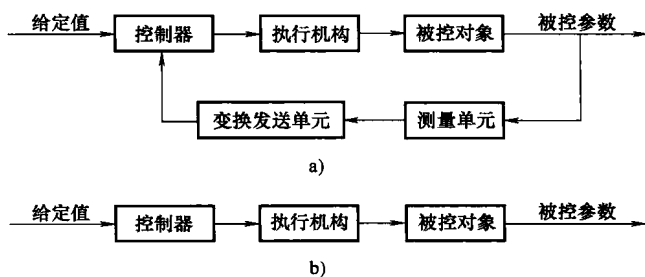


图 1-3 自动控制系统的的基本结构

a) 闭环控制系统 b) 开环控制系统

1.3 计算机控制系统基本原理

若将自动控制系统中控制器的功能用计算机或数字控制装置来实现，就构成了计算机控制系统，其基本框图如图 1-4 所示。因此，简单说来，计算机控制系统就是由各种各样的计算机参与控制的一类系统。

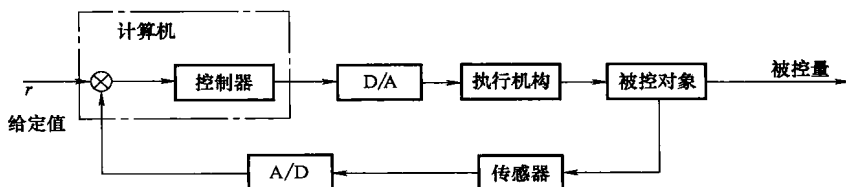


图 1-4 计算机控制系统基本原理图

在一般的模拟控制系统中，控制规律是由硬件电路产生的，要改变控制规律就要更改硬件电路。而在计算机控制系统中，控制规律是用软件实现的，计算机执行预定的控制程序就能实现对被控参数的控制。因此，要改变控制规律，只需改变控制程序就可以。这就使控制系统的设计更加灵活方便。特别是可以利用计算机强大的计算、逻辑判断、存储记忆、信息传递能力，实现更为复杂的控制规律，如非线性控制、逻辑控制、自适应控制、最优控制及

智能控制等。

计算机控制系统中，计算机的输入和输出信号都是数字量，因此在这样的系统中，需要使用将模拟量转换成数字量的 A/D 转换器，以及将数字量转换成模拟量的 D/A 转换器。典型的计算机控制系统组成结构如图 1-5 所示。

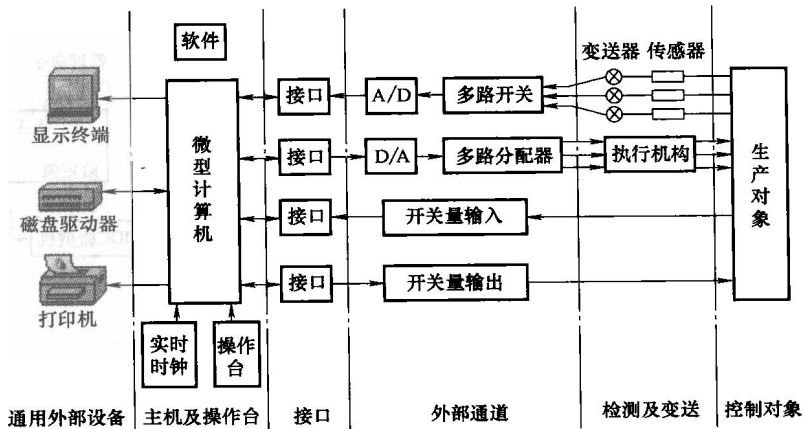


图 1-5 典型计算机控制系统的组成结构

计算机控制系统的控制过程一般可归纳为三个步骤：

- (1) 实时数据采集 实时采集被控参数的瞬时值，并输入计算机。
- (2) 实时决策控制 分析采集到的表征被控参数的状态量，并按已确定的控制规律决定进一步的控制行为。
- (3) 实时控制输出 根据作出的控制决策，适时地向执行机构发出控制信号，在线、实时地执行控制任务。

以上过程不断重复，使整个系统能在要求的动态性能指标内工作。此外，计算机控制系统还应该能对被控参数和设备本身可能出现的异常状态进行及时监督和处理。虽然计算机实际上只进行算术、逻辑操作和数据传递等工作，但控制过程的三个步骤主要是由计算机完成的。

1.4 计算机控制系统的分类

计算机控制系统与其所控制的对象、采取的控制方法密切相关。因此，计算机控制系统的分类方法很多，可以按照系统的功能、控制规律或控制方式等进行分类。

1.4.1 按功能及结构分类

1. 操作指导控制系统

操作指导控制系统（Operation Guidance Control, OGC）的组成如图 1-6 所示。计算机根据一定的算法，依据检测元件测得的信号数据，对生产过程的大量参数作巡回检测、处理、分析、记录以及参数的超限报警等。通过对大量参数的统计和实时分析，预测生产过程的各种趋势，为操作人员提供参考。或者计算出可供操作人员选择的最优操作条件及操作方案。操作人员则根据计算机输出的信息去改变调节器的给定值或直接操作执行机构。

2. 直接数字控制系统

直接数字控制系统 (Direct Digital Control, DDC) 的结构如图 1-7 所示。计算机通过测量元件对一个或多个物理量进行循环检测, 检测得到的信号经采样、A/D 转换为数字量, 并根据规定的规律进行运算, 然后发出控制信号经 D/A 转换直接控制执行机构, 使各个被控量达到预定的要求。

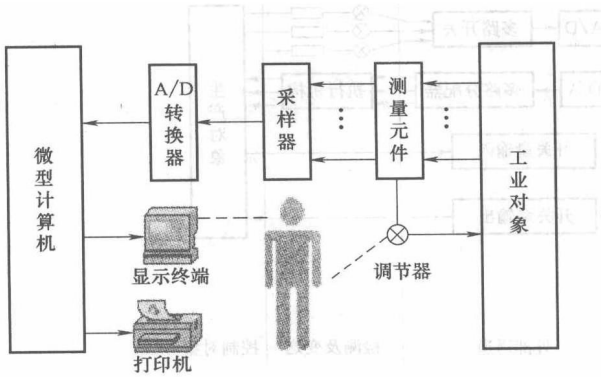


图 1-6 操作指导控制系统的组成

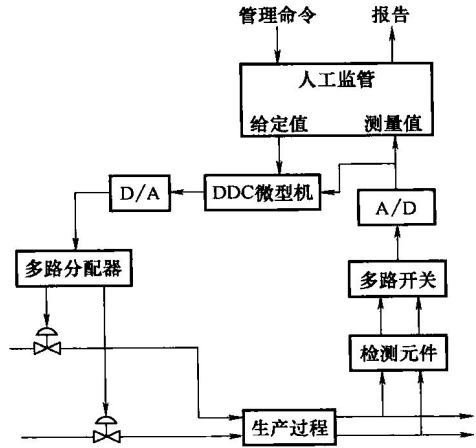


图 1-7 直接数字控制系统的结构

DDC 系统中的计算机参加闭环控制过程, 它不仅能完全取代模拟调节器, 实现多回路的 PID (比例、积分、微分) 调节, 而且不需改变硬件, 只通过改变程序就能有效地实现较复杂的控制, 如前馈控制、非线性控制、自适应控制、最优控制等。

DDC 系统是计算机用于工业生产过程控制的最典型的一种系统, 在热工、化工、机械、冶金等部门已获得广泛应用。

3. 监督控制系统

监督控制系统 (Supervisory Computer Control, SCC) 的结构如图 1-8 所示。它是操作指导控制系统和 DDC 系统的综合与发展。它由计算机按照描述生产过程的数学模型, 计算出最佳给定值送给模拟调节器或 DDC 计算机。最后由模拟调节器或 DDC 计算机控制生产过程, 使得生产过程始终处于最优工作状态。SCC 系统比 DDC 系统更接近实际生产情况, 它不仅可以进行给定值控制, 同时还可以进行顺序控制、最优控制等。该类系统有两种结构形式: 一种是 SCC + 模拟调节器, 另一种是 SCC + DDC, 一级为 SCC 监控级, 另一级为 DDC 控制级。

(1) SCC + 模拟调节器的控制系统 该系统原理图如图 1-8a 所示。在此系统中, 由计算机系统对各物理量进行巡回检测, 按一定的数学模型计算出最佳给定值并送给模拟调节器, 此给定值在模拟调节器中与检测值进行比较, 其偏差值经模拟调节器计算, 然后输出到执行机构, 以达到调节生产过程的目的。当 SCC 计算机出现故障时, 可由模拟调节器独立完成操作。

(2) SCC + DDC 的控制系统 该系统原理图如图 1-8b 所示。这实际上是一个两级控制系统, 一级为 SCC 监控级, 另一级为 DDC 控制级。SCC 的作用与 SCC + 模拟调节器系统中的 SCC 一样, 完成车间或工段一级的最优化分析和计算, 并给出最佳给定值, 送给 DDC 级

计算机直接控制生产过程。两级计算机之间通过接口进行信息联系，当 SCC 级计算机出现故障时，可由 DDC 级计算机代替，因此大大提高了系统的可靠性。

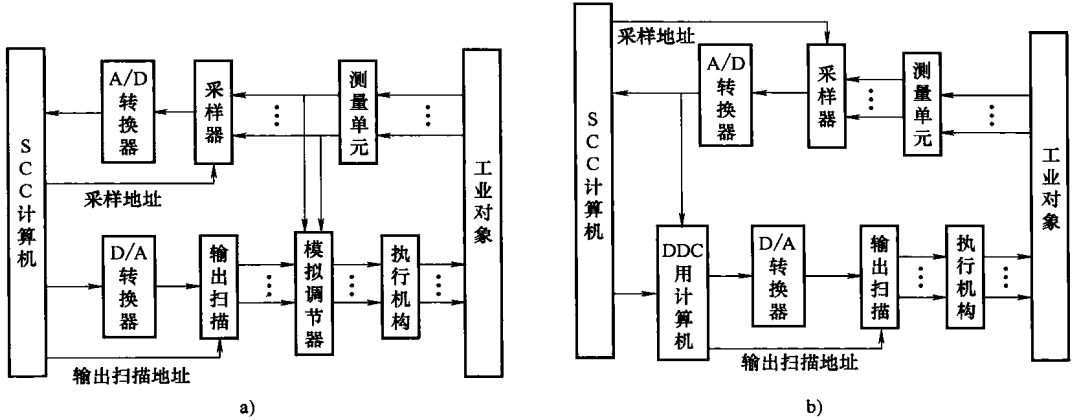


图 1-8 监督控制系统的结构

a) SCC + 模拟调节器原理图 b) SCC + DDC 原理图

4. 集散控制系统

集散控制系统 (Distributed Control System, DCS) 亦称分布式控制系统，是相对于集中式控制系统而言的一种计算机控制系统，它是一种尽量将控制功能分散，而将管理和监视功能集中的一种计算机控制系统。DCS 的基本结构如图 1-9 所示，一般由控制器、I/O 板、通信网络、操作站和工程师站 5 部分组成。

现在欧、美、日等国的西门子、罗克韦尔，以及国内的浙大中控、和利时等都已大批量生产各种型号的集散控制系统，尽管型号不同，功能各异，然而它们的基本结构仍如图 1-9 所示，都是大同小异。

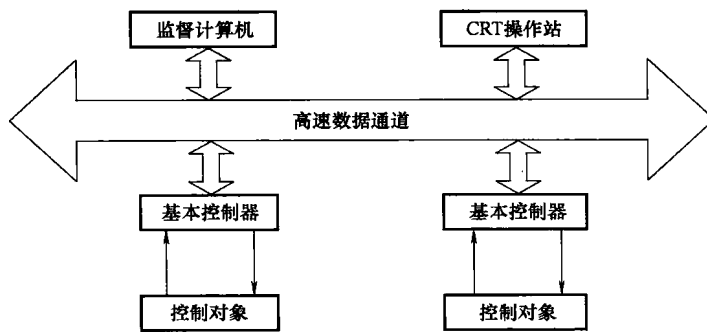


图 1-9 集散控制系统的基本结构

集散控制系统采用积木式结构，配置灵活、大小可选、易于扩展；系统将控制功能分散，易于实现复杂的控制规律、可靠性高；系统利用通信网络把各分散点的信息集中，操作简便、管理方便；系统在地理上分散，电缆数量少、敷缆成本低、施工周期短。传统的集散控制系统中，控制器与被控对象之间传输的一般来说仍然是 4 ~ 20mA 的模拟信号。

现在的集散控制系统由于引入了数据通信技术，可组成图 1-10 所示的分级计算机控制系统。

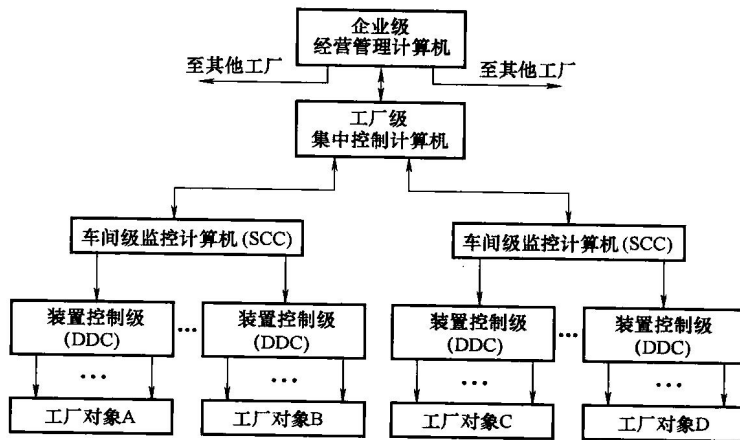


图 1-10 分级计算机控制系统

5. 现场总线控制系统

现场总线 (FieldBus) 是随着数字通信延伸到工业过程现场而出现的一种用于现场仪表与控制室系统之间的全数字化、开放性、双向多站的通信系统, 使计算机控制系统发展成为具有测量、控制、执行和过程诊断等综合能力的网络化控制系统。现场总线控制系统如图 1-11 所示, 它实际上融合了自动控制、智能仪表、计算机网络和开放系统互联 (OSI) 等技术的精粹。

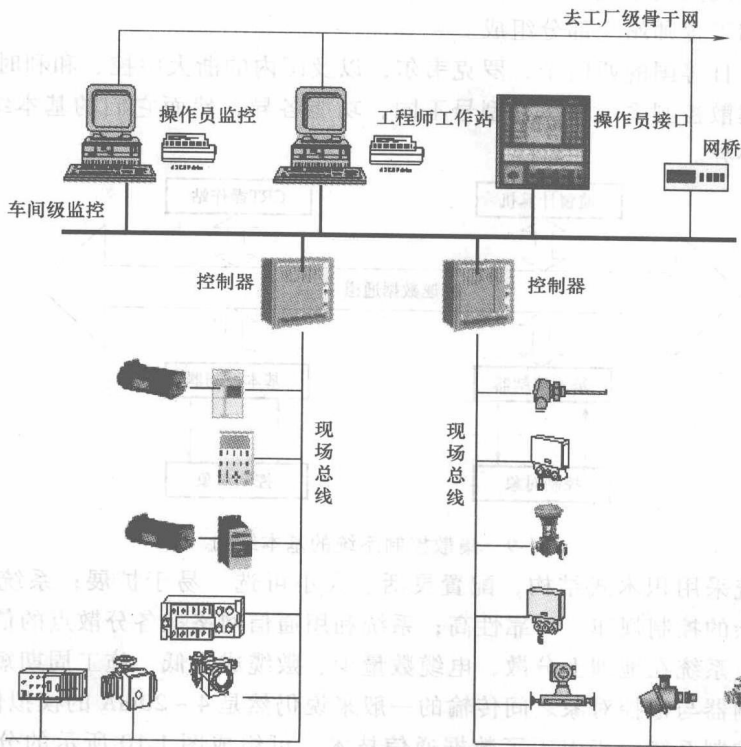


图 1-11 现场总线控制系统

现场总线等控制网络的出现使控制系统的体系结构发生了根本性改变，形成了在功能上管理集中、控制分散，在结构上横向分散、纵向分级的体系结构。把基本控制功能下放到现场具有智能的芯片或功能块中，不同现场设备中的功能块可以构成完整的控制回路，使控制功能彻底分散，直接面对生产过程。把同时具有控制、测量与通信功能的功能块及功能块应用进程作为网络节点，采用开放的控制网络协议进行互连，形成现场层控制网络。

较之集散控制系统，现场总线的优点主要有：通过一对传输线，可挂接多个设备，实现多个数字信号的双向传输；数字信号完全取代了 4 ~ 20mA 模拟信号，实现了全数字通信；现场总线控制系统具有良好的开放性、互可操作性与互用性；现场设备具有高度的智能化与功能自治性，将基本过程控制、报警和计算等功能分布在现场完成，使系统结构高度分散，提高了系统的可靠性；对现场环境的高度适应性；使设备易于增加非控制信息，如自诊断信息、组态信息以及补偿信息等；易于实现现场管理和控制的统一。

6. 工业以太网控制系统

通常，人们习惯上将用于工业控制系统的以太网统称为工业以太网。目前工业以太网正在工业自动化和过程控制市场迅速增长。

以太网具有传输速度快、低耗、易于安装和兼容性好等方面的优势。由于它支持几乎所有流行的网络协议，所以在商业系统中被广泛采用。但是商用以太网采用的多路存取载波侦听碰撞检测（CSMA/CD）通信方式，数据在传输过程中会产生传输延滞，在实时性要求较高的场合下会产生数据通信的“不确定性”。为此，各大公司和标准化组织纷纷提出各种解决以太网实时性与确定性的技术方案。

图 1-12 所示是笔者参加制定的我国工业自动化领域第一个具有自主知识产权的国际标准——《用于工业测量与控制系统的 EPA 系统结构与通信规范》中定义的 EPA（Ethernet for Plant Automation）控制系统的典型结构。

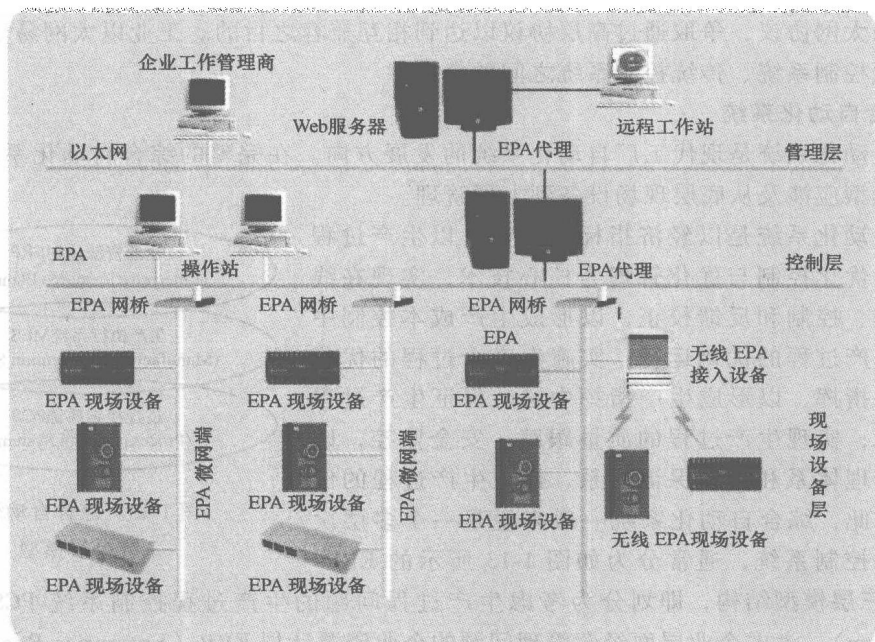


图 1-12 EPA 控制系统典型结构

以太网具有其他网络无法比拟的优势，主要体现在：

(1) 应用广泛 以太网是目前应用最为广泛的计算机网络技术，受到广泛的技术支持。因此，如果采用以太网作为现场总线，可以保证有多种开发工具、开发环境供选择。事实上，以太网已经成为控制网络结构中管理层与监控层网络的普遍选择。

(2) 成本低廉 由于以太网的应用最为广泛，因此受到硬件开发与生产厂商的高度重视与广泛支持，有多种硬件产品供用户选择，硬件价格也相对低廉。目前以太网网卡的价格只有 ProfiBus、FF 等现场总线的十分之一，并且随着集成电路技术的发展，其价格还会进一步下降。

(3) 通信速率高 目前以太网的通信速率为 10Mbit/s，100Mbit/s 的快速以太网也开始广泛应用，1000Mbit/s 以太网技术也逐渐成熟，10Gbit/s 以太网也正在研究。以太网的速率比目前的现场总线快得多，可以满足对带宽有更高要求的应用需要。

(4) 软硬件资源丰富 由于以太网已应用多年，人们对以太网的设计、应用等方面有很多的经验，对其技术也十分熟悉。大量的软件资源和设计经验可以显著降低系统的开发和培训费用，从而可以显著降低系统的整体成本，并大大加快系统的开发和推广速度。

(5) 可持续发展能力强 工业控制网络采用以太网，就可以使其发展汇入计算机网络技术的主流，从而使工业控制网络与信息网络技术互相促进，共同发展，并保证技术上的可持续发展，在技术升级方面无需单独的研究投入。

(6) 易于实现管控一体化——E 网到底 易于实现控制网络与信息网络的无缝集成，建立统一的企业网络。可实现嵌入式控制器、智能现场测控仪表和传感器方便地接入以太网，直至与 Internet 相联。

(7) 易于实现多种现场总线控制系统的集成 近年来，随着以太网技术的迅速发展，以太网作为现场总线的中高层通信网络已形成共识，主流现场总线都在各自修改其应用层协议，支持以太网协议，争取通过高层协议以达到相互兼容之目的。工业以太网易于实现与各种现场总线控制系统、传统控制系统之间的集成。

7. 综合自动化系统

综合自动化系统是现代工厂自动化系统的发展方向。在完整的综合自动化系统架构中，控制网络模型应涉及从底层现场设备到上层管理。

综合自动化系统是以经济指标为目标，以生产过程优化运行、优化控制与优化管理为核心技术，实现在线成本的预测、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；实现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。因此，综合自动化系统一般来说是一个多层次递阶的集成控制系统，通常分为如图 1-13 所示的 ERP/

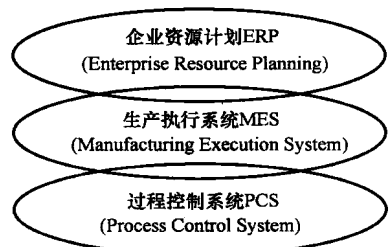


图 1-13 综合自动化系统分层模型

MES/PCS/三层模型结构，即划分为考虑生产过程问题的生产过程控制系统 PCS (Process Control System)，考虑企业层面经营管理问题的企业资源计划 ERP (Enterprise Resource Planning) 系统以及同时考虑生产与管理结合问题的中间层——生产执行系统 MES (Manufactur-

ing Execution System, 又称制造执行系统) 三个层次。

综合自动化系统的典型体系结构如图 1-14 所示, 综合自动化系统的组成如图 1-15 所示。各部分的主要内容如下。

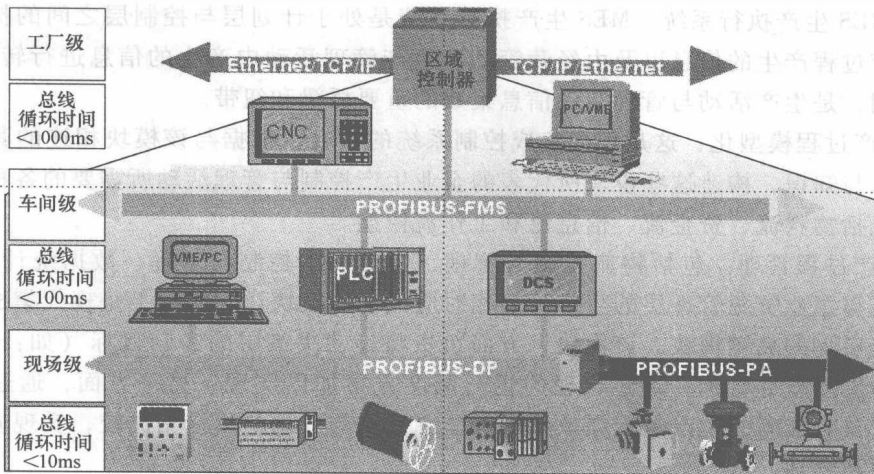


图 1-14 综合自动化系统的典型体系结构

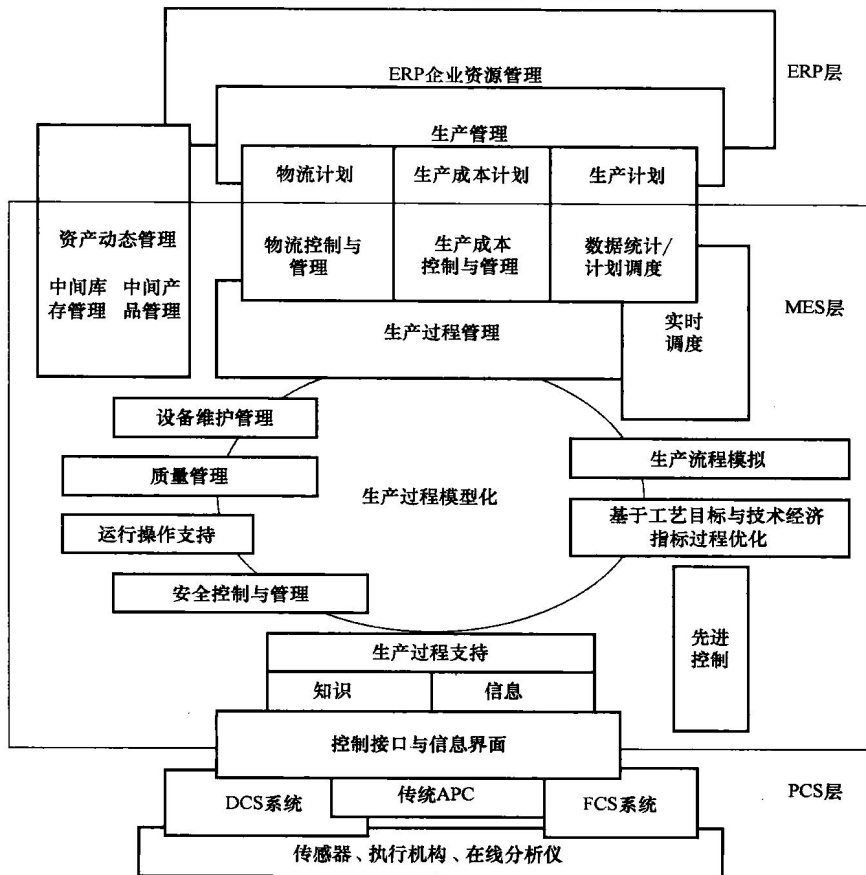


图 1-15 综合自动化系统的组成

(1) ERP 企业资源计划系统 ERP 企业资源计划系统包括人力资源管理、财务管理、生产数据管理、生产计划管理、生产作业计划管理等企业经营管理功能, 对企业各种资源进行有效的管理。

(2) MES 生产执行系统 MES 生产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。

1) 生产过程模型化: 这是现代集成控制系统的核心, 根据与该模块相连的其他模块所提供的信息与知识, 构造这些模块所代表的企业生产控制与管理活动所需要的各种类型的模型, 主要包括物料流、资金流、信息流和工作流模型。

2) 生产过程管理: 包括物流控制与管理、生产成本控制与管理、数据统计/生产调度等功能, 是与企业资源管理层的生产计划相对应的功能模块。它实际上是现代集成控制系统架构中承上启下的关键模块。该模块一方面负责将经营决策层的经营目标(如: 生产计划、成本、劳动生产率等目标)通过合理的生产调度方案加以实现; 另一方面, 通过生产数据统计, 进行及时准确的生产过程绩效分析和监测, 并与计划的目标相比较, 实现质量、成本的闭环控制和管理。

3) 生产过程支持: 提供基于知识和基于信息的支持, 将其他模块送来的数据、信息和知识进行加工、处理, 形成相应的方法、算法或软件, 为现代集成控制系统各功能模块提供支持。

4) 基于工艺目标与技术经济指标的过程优化: 建立过程参数与工艺目标或技术经济指标之间的联系。提供以保证工艺目标或技术经济指标为前提的过程参数优化支持, 并通过接口向先进控制层提供最佳的操作条件。

5) 先进控制: 包括用于过程优化控制的多变量先进控制(MAPC)、智能控制方法和算法等。先进控制是对那些不同于常规单回路 PID 控制, 并具有比常规 PID 控制更好控制效果的控制策略的统称, 而非专指某种计算机控制算法。先进控制的任务是明确的, 即用来处理那些采用常规控制效果不好, 甚至无法控制的复杂工业过程控制问题。

6) 控制接口与信息界面: 与过程控制层的各个软硬件相连接, 调用 PLC、DCS、FCS、EPA 或其他过程控制装备中的过程信息, 并发出 MES 层根据生产计划和生产过程的实际情况作出的控制策略。目前实时数据库监控软件平台已成为 MES 层控制接口与信息界面事实上的标准配置, 实时数据库监控软件平台可以实现企业网络环境下的实时数据采集、实时流程查看、实时趋势浏览、报警记录与查看、开关量变位记录与查看、报表数据存储、历史趋势存储与查看、生产过程报表生成、生产统计报表生成以及标准 ODBC/SQL 过程数据接口等功能, 从而实现企业过程控制系统与信息系统的网络集成和综合管理。

7) 实时调度: 包括基于模型、基于数据和基于知识的多种动态调度算法, 利用流程模拟模型, 针对供需变动、工艺切换、资源波动、设备故障变化等装置状况, 实时地作出生产方案、工艺路线和资源分配, 进行生产作业计划的优化调度, 以最少的能耗、最高的安全性或最大的产品效益, 确定各个生产装置的负荷。实时调度其实是一类特殊的在线、多段、多目标、实时优化问题, 由于流程企业生产过程的复杂性, 目前实时调度尚未有广泛的应用。

8) 质量管理: 管理生产过程中所有与质量有关的信息, 包括从过程控制系统获取的实