



“十一五”规划教材

数字控制系统

——分析、设计与实现

杨国安 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

TP273/480

2008



“十一五”规划

数字控制系统

——分析、设计与实现

杨国安 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书比较系统地阐述了数字控制系统分析、设计与实现的基本理论与方法,并且每一章都配有 Matlab 仿真实现,可以帮助加深理解这些理论与方法。全书共分 8 章,其主要内容包括:数字控制系统的组成与分类,数字控制系统的发展概况与趋势;采样定理与采样过程,数字信号的生成与表示;数字控制系统的数学描述——脉冲传递函数、差分方程和状态方程;数字控制系统的动态性能分析;离散状态空间分析;数字仿真系统分析;数字控制系统的离散化设计;数字控制系统的模拟化设计;离散状态空间设计;数字控制系统的实现。本书结合理论讲解大量的例题,将深奥的理论通过例题理解有事半功倍之效。同时,每章配有习题为读者进一步学习之用。本书另配有多媒体课件和 Matlab 仿真实现源程序。

本书可以作为高等学校计算机、电子、信息工程自动化和机械电子专业的本科生教材,同时也可作为有关科研技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字控制系统:分析、设计与实现/杨国安编著. —西安:西安交通大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5605-2628-7

I. 数… II. 杨… III. 数字控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 186543 号

书 名 数字控制系统——分析、设计与实现
编 著 杨国安
责任编辑 李 晶

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 陕西江源印刷科技有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 22.875 字数 425 千字
版次 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-2628-7/TP·502
定 价 34.00 元

读者购书、书店添货如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdgy31@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

本书是在作者原来编著的《数字控制系统》讲义基础上,根据最近几年的教学实践和科研成果,并参考国内外相关优秀教材编著而成。书中内容反映了数字控制系统的发展现状,讲述了数字控制系统基本理论与方法,并通过较多的例题和 Matlab 仿真实现来阐述难以理解的各种理论和方法,使读者达到事半功倍的效果。

本书首先对计算机控制系统的主要特征、发展现状和实际应用给出了基本的阐述,使得读者对计算机控制系统有一个初步的认识。然后讲述本书的基础理论——数字控制系统分析,包括数字信号的表示,数字控制系统的数学描述——差分方程、Z 传递函数、状态方程描述,以及基于时域、频域和根轨迹分析的数字控制系统动态分析,稳定性分析和稳态误差分析。同时,还通过 Matlab 控制箱和用于离散系统分析的 RPI 函数库对相关理论和方法给予系统仿真,使得读者加深理解本部分内容。在此基础理论分析之上,将分章讲述相对独立的离散状态空间分析和数字仿真系统分析,以及数字控制系统的离散化设计、数字控制系统的模拟化设计、离散状态空间设计和两个具体的数字控制系统应用实例。

用于数字控制系统基本理论与方法仿真实现的 RPI 函数库可以参考 Book Ware Companion Resource Center 的网址 <http://brookscole.com//engineering//bookware//>。RPI 函数库可以实现 Matlab 控制工具箱中没有的计算和仿真。

本教材特点是,讲解通俗易懂,深入浅出,将一个复杂、抽象的概念或原理孕育于简单实例之中,同时配有大量的典型例题、Matlab 仿真实现的应用软件,以及常用的数字控制系统实验和多媒体教学资料。多媒体教学使学生感到生动形象,而且易于理解、便于记忆。

本书通过在西安交通大学电子与信息工程学院计算机、信息工程、自动化、本硕连读和教学改革试点班本科高年级的多次试用,在取得初步教学成果,并大量听取有关专家和学生反馈意见基础上,不

断地更新、补充和提高最终形成本书。本书的初稿由西安交通大学曹秉刚教授审阅,并提出了许多宝贵的修改和补充建议,在此表示衷心的感谢。另外,西安交通大学人工智能与机器人研究所的研究生张鹏、张阳军、闫玉珍同学为本书的出版做了很多工作,在此一并致谢。

由于作者知识水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

杨国安
2008年2月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数字控制系统概述	(1)
1.2 数字控制系统的组成	(4)
1.3 数字控制系统的分类	(6)
1.4 数字控制系统的主要优点	(10)
1.5 数字控制系统的发展趋势	(11)
习题 1	(12)
第 2 章 数字控制系统分析	(13)
2.1 数字信号的表示	(13)
2.1.1 信号的种类	(13)
2.1.2 数字控制	(14)
2.1.3 采样过程与 Matlab 仿真	(17)
2.1.4 采样周期的选取	(24)
2.1.5 保持器与 Matlab 仿真	(25)
2.2 数字控制系统的数学描述	(34)
2.2.1 线性差分方程描述	(34)
2.2.2 Z 传递函数描述与 Matlab 仿真	(42)
2.2.3 状态空间描述与 Matlab 仿真	(61)
2.3 数字控制系统的性能分析	(69)
2.3.1 时域响应分析	(69)
2.3.2 根轨迹分析	(77)
2.3.3 频域响应分析	(81)
2.3.4 Matlab 仿真——系统性能分析	(91)
2.3.5 稳定性分析	(98)
2.3.6 稳态误差分析	(106)
2.3.7 广义 Z 变换	(108)
习题 2	(114)
第 3 章 离散状态空间分析	(117)
3.1 离散系统的状态空间表示与转换	(117)

3.1.1	差分方程化离散状态空间	(117)
3.1.2	Z 传递函数化离散状态空间	(120)
3.1.3	传递函数化 Z 传递函数	(134)
3.1.4	连续与离散状态空间的相互转换	(138)
3.1.5	数字控制系统的状态空间表示	(141)
3.1.6	Matlab 仿真——离散化方法	(144)
3.2	离散系统的可控性与可观测性	(148)
3.2.1	离散系统的可控性	(148)
3.2.2	离散系统的可观测性	(150)
3.2.3	Matlab 仿真——可控性与可观测性	(152)
3.2.4	可控标准型与可观测标准型	(153)
3.2.5	Matlab 仿真——模态转换	(155)
3.3	极点配置与状态观测器分析	(157)
3.3.1	极点配置	(157)
3.3.2	状态观测器	(161)
3.3.3	带状态观测器的反馈控制器	(164)
3.3.4	最优状态反馈设计——Lyapunov 第二法	(165)
3.3.5	Matlab 仿真——极点配置与状态观测器设计	(168)
3.4	几个相关矩阵的运算结果	(176)
	习题 3	(177)
第 4 章	数字仿真系统分析	(181)
4.1	连续系统的数字仿真分析	(181)
4.1.1	带采样和保持器的数字仿真	(181)
4.1.2	数值积分的数字仿真	(184)
4.1.3	Z 型数字仿真	(187)
4.2	离散系统的数字仿真分析	(190)
4.2.1	离散系统 I 型的数字仿真	(191)
4.2.2	离散系统 II 型的数字仿真	(194)
4.2.3	离散系统 III 型的数字仿真	(200)
	习题 4	(205)
第 5 章	数字控制系统的离散化设计	(207)
5.1	数字控制器的离散化设计	(207)
5.1.1	W 变换设计法	(207)
5.1.2	直接设计法	(209)

5.1.3 根轨迹设计法	(214)
5.1.4 Matlab 仿真——数字滤波器	(216)
5.2 最少拍系统设计	(224)
5.2.1 最少拍设计法	(224)
5.2.2 最少拍无波纹系统的设计	(230)
5.2.3 扰动系统的最少拍设计	(233)
5.3 最小均方误差系统的设计	(236)
5.4 纯滞后系统数字控制器设计	(241)
5.4.1 大林算法	(241)
5.4.2 纯滞后补偿控制器设计	(247)
习题 5	(254)
第 6 章 数字控制系统的模拟化设计	(256)
6.1 数字控制器的模拟化设计	(256)
6.1.1 模拟化设计法	(256)
6.1.2 模拟控制器的离散化	(258)
6.1.3 Matlab 仿真——数字控制器的模拟化设计	(269)
6.2 数字 PID 控制器设计	(270)
6.2.1 数字 PID 控制器的基本算法	(270)
6.2.2 数字 PID 控制器算法的改进	(276)
6.2.3 PID 控制参数的整定	(279)
6.2.4 Matlab 仿真——PID 控制器设计	(281)
习题 6	(313)
第 7 章 离散状态空间设计	(317)
7.1 概述	(317)
7.2 离散状态空间设计法	(318)
7.2.1 单输入-单输出系统的设计	(318)
7.2.2 多输入-多输出系统的设计	(324)
7.3 最小能量控制系统设计	(329)
7.4 二次型指标的最优控制设计	(333)
习题 7	(337)
第 8 章 数字控制系统的应用	(340)
8.1 球-梁数字控制系统	(340)
8.2 倒立摆数字控制系统	(348)
参考文献	(357)

第 1 章 绪 论

数字控制系统又称为计算机控制系统,它是在自动控制技术和计算机技术高速发展的基础上产生的。20 世纪 50 年代中期,经典控制理论已经发展得十分成熟,而且在很多工程技术领域中得到成功应用。模拟式或称为连续时间自动控制系统发展已经十分完善,目前它仍然在工业生产中占据很重要的地位。虽然这种连续控制系统对单输入单输出系统很有效,且对较为复杂的多输入多输出的参数相互耦合的系统也曾起过积极作用,但是,随着科学技术的发展,连续控制系统在控制算法的实现,系统的优化、稳定性、可靠性和控制精度等方面越来越不能满足更高的要求,限制了它的进一步发展。现代控制理论的形成与发展为多输入多输出和复杂控制系统的分析、设计与实现提供了坚实的理论基础,而计算机技术的迅猛发展为新型控制算法的实现提供了有效的手段,两者的结合极大地推动了数字控制系统的发展。

1.1 数字控制系统概述

计算机在工业控制中主要有两个方面的作用:一方面,对复杂控制系统进行数字仿真和科学计算;另一方面,计算机作为控制系统中的重要组成部分,完成各种控制任务。如图 1.1 所示的一个连续时间闭环控制系统的工作原理是,通过检测装置对被控对象的被控参数(温度、压力、流量、速度、位移等)进行测量,再由变换发送装置将被测参数变换成电信号,同时反馈给控制器。控制器将反馈回来的信号与给定信号进行比较求得误差,控制器按照某种控制算法对误差进行计算,并产

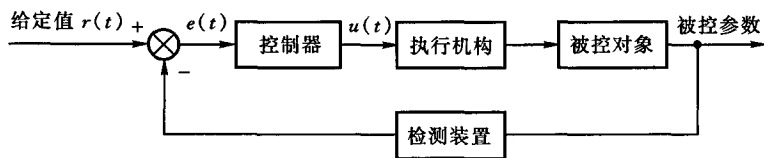


图 1.1 连续时间控制系统的典型结构

生控制信号驱动执行机构工作,从而使被控参数的值达到期望值或者与给定值一致。综上所述,自动控制系统的主要工作是完成信号的传递、加工、比较和控制。这些功能是由检测装置、变换发送装置、控制器和执行机构来实现的。其中控制器是控制系统中的核心,它对控制系统的控制性能和应用范围起着决定性作用。

当将连续控制系统中的控制器的功能用计算机或数字控制装置来实现时,便构成了数字控制系统,又称计算机控制系统,其基本框图如图 1.2 所示。

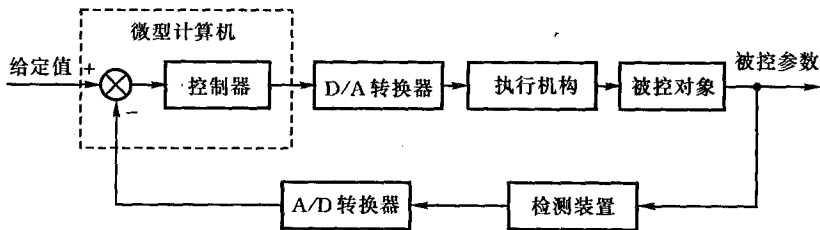


图 1.2 数字控制系统基本框图

在数字控制系统中,计算机的输入和输出信号都是数字量,而在图 1.2 的数字控制系统中,控制器的输入和输出信号都是数字信号,而被控对象的被控参数和执行机构的输入信号一般都是模拟信号,因此,需要有将模拟信号转换为数字信号的模数转换器(A/D 转换器)和将数字信号转换为模拟信号的数模转换器(D/A 转换器),这样这个数字信号和模拟信号混合的系统才能协调工作。

数字控制系统的数学模型如图 1.3 表示,其最大的特征就是采样,以及在数字模块和模拟模块之间必须加入保持器,且一般采用零阶保持器,它的功能一般是由 D/A 转换器来实现。

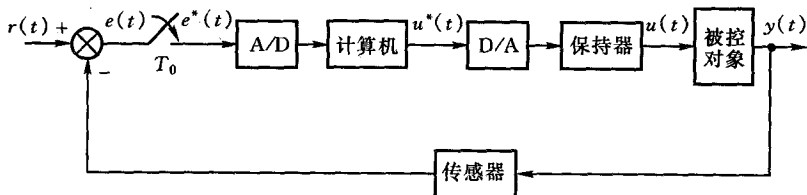


图 1.3 数字控制系统的数学模型

多输入-多输出数字控制系统如图 1.4 所示,其中,模拟模块是由状态空间给出。

数字控制系统的主要作用如下:

(1) 信息处理:对于复杂控制系统,输入信号和根据控制算法要求对误差进行

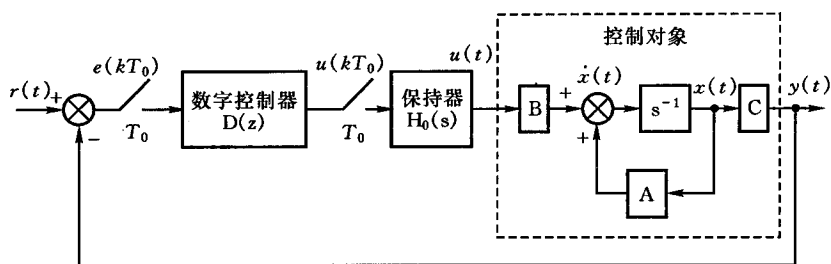


图 1.4 多输入-多输出计算机控制系统

计算时的计算量很大,采用模拟解算装置达不到所需精度,需要计算机处理。

(2) 实时控制:计算机控制系统是通过软件程序来实现系统控制的,并不断地对系统进行校正以达到所需的动态特性。

(3) 复杂计算:计算机具有快速实现复杂计算的功能,因而可以实现系统的最优控制、自适应控制等高级控制功能和多功能计算调节。

数字控制系统的控制过程可分为三步:

(1) 实时数据采集:对被控对象的被控参数进行实时检测,同时传送给计算机进行处理。

(2) 实时决策:对采集到的被控参数的状态量进行分析,并按照某种控制算法计算出控制量,决定下一步的控制过程。

(3) 实时控制:根据决策实时地向执行器发出控制信号。

“实时”是指信号的输入、计算、输出都要在采样间隔内完成。计算机控制系统的这种控制作用不断地重复,使得整个系统能够按照一定的动态品质指标进行工作,并且使整个控制系统达到所需要的性能指标;同时对被控参数和设备本身所出现的异常状态能够及时地进行监测和处理。其控制算法流程如图 1.5 所示。

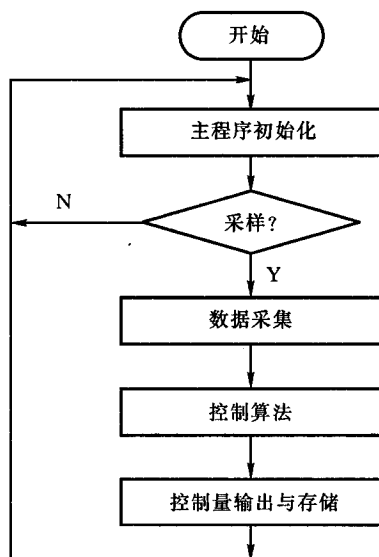


图 1.5 数字控制流程图

1.2 数字控制系统的组成

数字控制系统由计算机、外部设备、操作台、输入通道、输出通道、检测装置、执行机构、被控对象以及相应的软件组成,如图 1.6 所示。

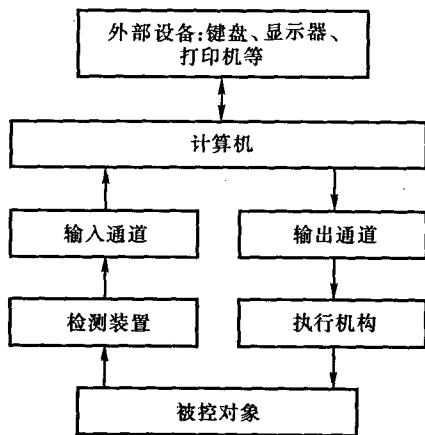


图 1.6 数字控制系统的组成

1. 计算机

计算机是数字控制系统的核心,通过接口可以向系统的各个部分发出各种控制指令,同时对被控对象的被控参数进行实时检测和处理。其功能是完成程序存储、程序执行、数值计算、逻辑判断、数据处理等。

2. 过程输入、输出通道

过程输入、输出通道是计算机和被控对象之间设置的信息传递和转换的连接通道。输入通道把被控对象的被控参数转换成计算机可以认知的数字代码,这一般需要采样、量化和编码三步来完成。输出通道把计算机输出的控制指令和数据转换成可以对被控对象进行控制的控制信号。输入、输出通道一般包括:模拟量输入通道、模拟量输出通道、数字量输入通道、数字量输出通道。

3. 外部设备

外部设备是实现计算机和外界信息交换的设备,简称外设。外部设备包括人-机通信设备,输入、输出设备和外存储器等。

输入设备:键盘、扫描仪、光电输入机等,用来输入程序和数据。

输出设备:打印机、记录仪、显示器等,主要用来向操作人员提供信息和数据,以便及时了解控制过程。

外存储器:包括磁带、磁盘等,用来存储系统程序和数据。

4. 检测装置

为了对被控对象进行控制,必须首先对被控对象的被控参数进行数据采集,例如温度、压力、液位、速度等,它是由检测装置来完成的,检测装置即传感器,可以将非电量参数转换成电量参数,再送到计算机。

5. 执行机构

执行机构是计算机控制系统的一个重要组成部分,它是控制任务的执行者,如电机等。

6. 操作台

操作台是操作人员和计算机控制系统进行对话的装置。主要包括:

(1) 显示装置 显示屏幕、荧光数码显示器、显示操作人员要求显示的内容和报警信号。

(2) 功能键 复位键、启动键、打印键、显示键、中断键。

(3) 数字键 输入某些数据或修改控制系统的某些参数。

7. 软件

软件是指能够完成计算机控制系统各种功能的程序。它是计算机控制系统的中枢神经。在软件的指挥下,整个系统进行协调工作。软件包括系统软件和应用软件。

(1) 系统软件 是为提高计算机使用效率,扩大功能,为用户使用、维护和管理计算机提供方便的程序的总称。系统软件包括操作系统、语言加工系统和诊断系统,具有一定的通用性,一般随硬件一起由计算机厂家提供。

(2) 应用软件 用户根据要解决的实际问题而编写的各种程序。在计算机控制系统中则是指完成系统各种任务的程序,例如控制程序、数据采集和处理程序,巡回检测和报警程序。计算机控制系统的硬件实现示意图如图 1.7 所示。

8. 被控对象

一个实际的被控对象可以有各种各样的形式,但是,如果抽象成数学模型,可由以下几种典型的传递函数来表示。

(1) 放大环节 $G(s) = K$

(2) 惯性环节 $G(s) = \frac{K}{(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots(1+T_ns)}$

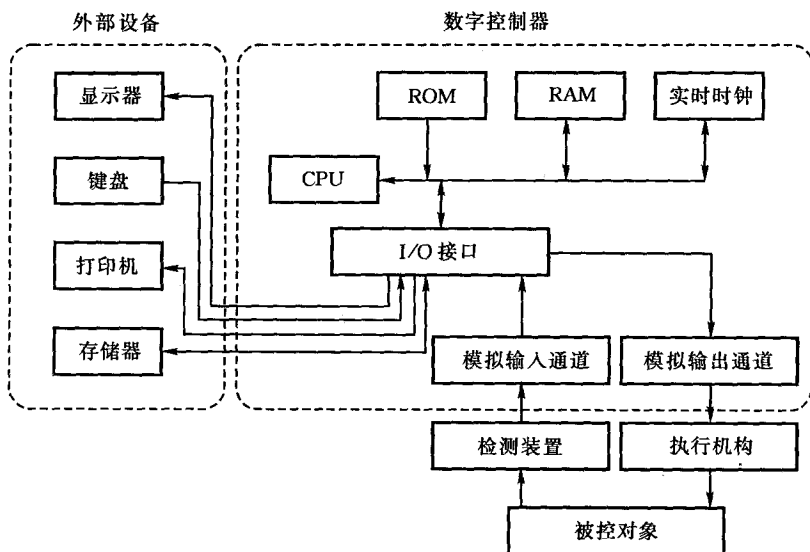


图 1.7 数字控制系统硬件实现示意图

(3) 积分环节 $G(s) = \frac{K}{T_i s^n}$

(4) 微分环节 $G(s) = \frac{K s^n}{T_i}$

(5) 纯滞后环节 $G(s) = e^{-\tau}$

(6) 放大/惯性/积分环节 $G(s) = \frac{K}{T_i s^n (1 + T_m s)^l}$

(7) 放大/惯性/纯滞后环节 $G(s) = \frac{K}{(1 + T_m s)^l} e^{-\tau}$

(8) 放大/积分/纯滞后环节 $G(s) = \frac{K}{T_i s^n} e^{-\tau}$

1.3 数字控制系统的分类

数字控制系统利用计算机强大的信息处理功能,不仅可以完成如图 1.2 所示的反馈控制功能,而且还可以实现其他各种自动控制功能,并根据其控制功能或者工作任务划分为以下几种常见的类型。

1. 计算机监测与操作指导系统

计算机监测与操作指导系统如图 1.8 所示。这种系统一般用于生产过程控制,其基本功能是监测和操作指导。监测是由计算机通过输入通道 A/D 接口构成的外围设备,实时地采集被控对象的被控参数,并经适当处理,例如数字滤波、非线性补偿、误差修正等,以数字、曲线或图表等形式,由 CRT 或 LCD 实时显示,同时向操作人员提供被控对象运行工况的信息,使操作人员可以对被控对象运行工况进行监视。这种系统只承担数据采集和处理工作,并不直接参与控制。计算机监视与操作指导系统是一种开环结构,它的优点是结构简单、控制灵活、安全可靠,缺点是需要人工操作,速度受到限制,因此不适应快速过程控制和多个对象的控制。

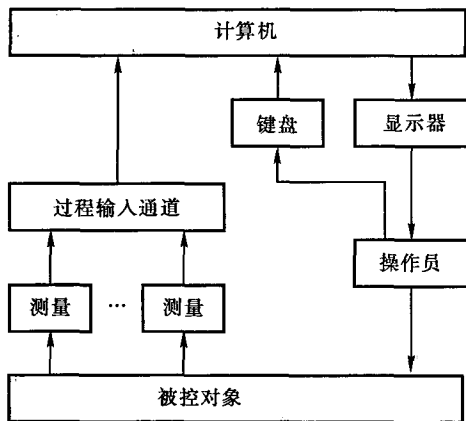


图 1.8 计算机监测与操作指导系统

2. 计算机直接数字控制系统

计算机直接数字控制系统(Direct Digital Control, DDC)是指利用计算机代替模拟控制器,直接对被控对象进行控制的系统。DDC 反馈控制系统的结构如图 1.2 所示。计算机通过测量元件对一个或多个物理量进行巡回监测,经采样、A/D 变换等过程把模拟量转换为数字量,并根据某种控制算法进行计算,然后发出控制信号直接控制执行机构,使得各个控制量达到预定的要求。DDC 控制系统通过计算机强大的数值计算和逻辑判断能力,利用软件不仅可以实现典型的反馈控制、前馈控制和串级控制等,还可以便捷地实现模拟控制器难以实现的各种先进复杂的控制算法,例如最优控制、自适应控制、多变量控制和智能控制等,从而获得更好的控制性能。DDC 系统与模拟控制系统的最大差别在于,前者是数字信号和模拟信号的混合系统,后者只有模拟信号。本书是以 DDC 系统为研究对象,形成了数字

控制系统的分析、设计与实现的基本方法。

3. 计算机顺序控制系统

计算机顺序控制系统中,计算机根据被控对象的运行状态,按照预定的时间先后顺序或逻辑顺序产生相应的操作命令,同时以开关量形式输出,使被控对象各个环节或部件按照预定的顺序协调动作完成生产加工任务。市场上出售的各种类型的可编程控制器,例如 PLC(Programming Logical Controller)就是专门用于顺序控制系统的控制。

4. 计算机监督控制系统

在直接数字控制系统中,被控参数的给定值是预先给定的,并存入到计算机内存中,它无法根据生产过程信息的变化而及时修正,因此,该系统不能使生产过程处于最优状态,显然这是我们所不期望的。而计算机监督控制系统(Supervisory Computer Control, SCC)是由 DDC 系统加监督功能构成的,其结构如图 1.9 所示。监督计算机根据被控对象运行工况的数据和预先给定的数学模型及性能目标函数,按照某种优化控制算法进行计算和逻辑判断,为 DDC 系统提供最优设定值,或者修正 DDC 系统控制算法中的参数、约束条件等,使得控制系统整体性能指标最佳。

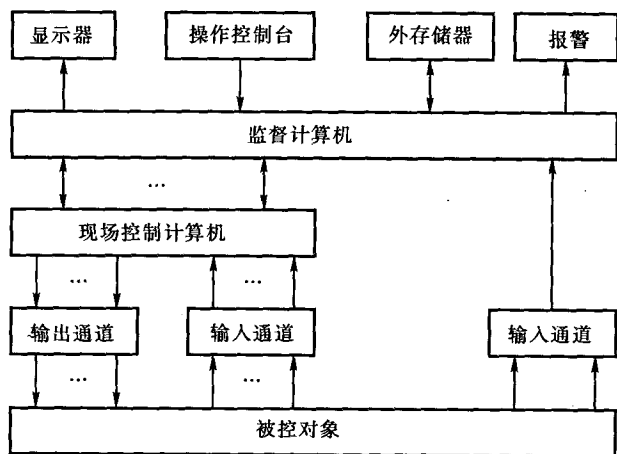


图 1.9 计算机监督控制系统

5. 计算机分级控制系统

随着现代计算机、通信技术、网络和显示技术的迅猛发展,使得数字控制系统不仅具有控制功能,也具有生产管理和指挥调度的功能。从图 1.10 可以看出,分

级控制系统的理论基础是大系统理论。如果把古典控制理论称为第一代控制理论,现代控制理论称为第二代控制理论的话,则大系统理论便可以称为第三代控制理论。如智能控制机器人就可以看成一个大系统,智能控制包含分级控制。计算机分级控制系统中,DDC级直接用于控制生产过程,包括数据采集、监督报警等。SSC级既要完成部分高级控制功能,又要向上级管理计算机反馈信息,使得管理计算机准确地管理整个大系统。这种系统的特点是将控制任务分散,可以利用多台计算机分别完成不同的任务,从而实现控制与管理的双重任务。

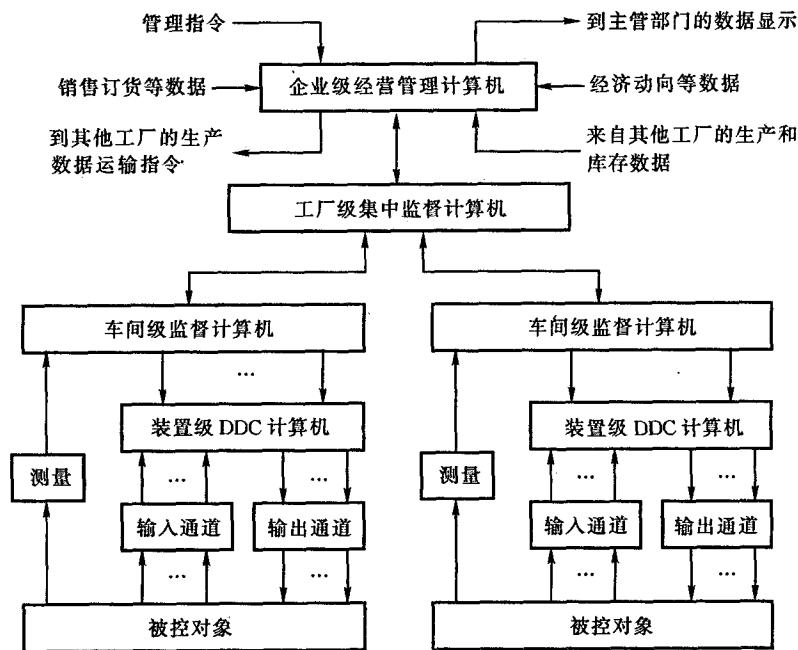


图 1.10 计算机分级控制系统

6. 集散型控制系统

集散型控制系统(Distributed Control System, DCS)的结构图如图1.11所示。这种系统是利用计算机通信技术,多台计算机由通信网互相连接而成的控制系统,它具有网络分布结构。DCS采用分散控制、集中管理、分而自治和综合协调的设计思想,将工业企业的生产过程控制、监督、协调与各项生产经营管理融为一体,由DCS中各子系统协调有序地工作,从而实现管理、控制一体化。系统从上至下分为过程控制级、控制管理级、生产经营管理级,形成分级分布式控制。其中,过程控制级由若干现场控制计算机对各个生产装置直接进行数据采集和控制;控制管理