

计算机控制技术

温钢云 黄道平 编著

华南理工大学出版社

计算机控制技术

温钢云 黄道平 编著

华南理工大学出版社
·广州·

内 容 简 介

本书除较全面介绍简单回路计算机控制系统的构成外, 主要围绕采样周期的选择和对象纯滞后时间对系统性能的影响, 较系统地介绍相关的计算机控制理论的成果和控制技术。全书内容主要包括计算机控制系统的构成, 系统模型, 模拟化和直接数字设计法, 伺服系统设计法, 内模控制算法和自校正控制设计方法, 以及部分算法的应用实例共九章。主要章节除有小结, 还附有足量的例子和适量的习题。

本书除可作为高等院校工业自动化、计算机应用等专业的教材外, 还可供非电类从事计算机控制的研究生和从事计算机控制和自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机控制技术/温钢云, 黄道平编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2001.8
(2002.1 重印)

ISBN 7-5623-1752-6

I. 计… II. ①温… ②黄… III. 计算机控制-技术 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 046755 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

发行电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn

<http://www2.scut.edu.cn/press>

责任编辑: 詹志青

印 刷 者: 广州市新明光印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.5 字数: 462 千

版 次: 2002 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

印 数: 2 001~5 000 册

定 价: 28.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

随着计算机技术、控制技术、通信技术、网络技术日新月异的发展，特别是信息技术的飞速发展，导致自动化领域发生了通过信息集成实施综合自动化的深刻变革，随着这一变革的深入，计算机控制的概念和计算机控制系统的结构也发生了革命性的变化；支持这场变革的其中一个基础就是研究如何将计算机技术和控制技术相结合，以实现对工业生产过程的控制，即简单回路计算机控制系统的控制技术。因此，结合具有中国社会主义特色的市场经济现状和即将与全球化市场经济接轨的前景，以及教学改革本身的需要，笔者在华南理工大学自动控制工程系的支持下，基于以简单回路计算机控制系统的基本控制技术为主要内容，便于组织课堂教学和学生自学，既有教学大纲规定的基本内容、又能反映计算机控制工程实践的部分应用领域而编写的《计算机控制技术》讲义已经试用了多年。根据这几年的教学实践和经验，以及最近出版的自动化类有关教材和著作，对原讲义的内容作了部分充实和修改，并整理成书出版。

本书共分九章。第一章是绪论，其中简洁地介绍了计算机控制系统的基本概念、应用分类和计算机控制系统的发展，以及分析综合计算机控制系统常用的性能指标。第二章介绍构成计算机控制系统相关的信号采样技术、信号转换技术、并行接口技术和串行通信技术。第三章介绍分析综合计算机控制系统常用的数学模型及其要点、数字控制器的编程方法，同时简介了计算机有限字长对系统性能的影响、扰动类型与常规计算机控制系统结构的关系。第四章介绍了适用于在模拟仪表中植入微处理器的模拟调节器离散化方法和几种常规控制算法，其中突出介绍抑制饱和效应和抗微分冲击的数字 PID 改进算法、以及实现算法的保证措施。第五章讨论了直接数字设计法设计数字控制器的几种方法及其实现要点。第六章介绍了基于状态空间的极点配置设计法设计伺服系统的方法和步骤，其中包括状态反馈、全阶状态观测器算法，以及最少拍设计的应用。第七章主要介绍了内模控制和动态矩阵控制两种算法。第八章主要介绍基于广义最小方差控制的控制器设计算法以及一种实用的最小二乘估计算法形式。第九章介绍计算机控制系统的应用实例。其中，第一章至第八章由温钢云编写，第九章由黄道平编写。

本书从编写之初，就一直得到 李在根 教授和毛宗源教授的支持和指点，他们还提供许多具体的帮助。书稿编写完后，毛宗源教授还仔细审阅，并提出很多有益的修改意见。在此，一并对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，视野有限，因此，缺点、不妥之处在所难免，恳请同行和读者批评指正。

编者

2000 年 9 月

责任编辑：詹志青

封面设计：韩 波

ISBN 7-5623-1752-6



9 787562 317524 >

ISBN 7-5623-1752-6
TP·112 定价：28.00元

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概况	1
第二节 计算机控制系统的一般概念	2
第三节 计算机控制系统的分类和发展	4
第四节 计算机控制系统的性能指标	8
小结	10
思考题 1	10
第二章 计算机控制系统的构成	11
第一节 采样与复现	12
一、采样与重构	12
二、频混现象和滤波	13
三、复现与零阶保持器	15
四、采样周期 T 的选择	16
第二节 量化	17
一、量化与量化误差	17
二、编码	18
第三节 数/模(D/A)转换器	20
一、D/A 转换器转换原理和基本结构	21
二、主要特性参数	22
三、应用例	22
四、模拟量输出通道的一般结构	25
第四节 模/数(A/D)转换器	27
一、A/D 转换原理和基本结构	27
二、主要特性参数	30
三、采样保持器	30
四、应用例	31
五、模拟量输入通道的一般结构和抗干扰措施	36
第五节 并行通用 I/O 接口	39
一、通用 I/O 接口的功能	39
二、使用可编程接口器件的几点注意事项	40
三、应用实例	43
第六节 串行通信接口	53
一、串行通信的基本概念	53
二、串行通信接口电路简介	55

三、Intel 8251 A—PCI 串行通信接口器件	56
四、应用例	65
小结	69
思考和练习题 2	70
第三章 计算机控制系统模型	74
第一节 脉冲传递函数	74
第二节 系统带零阶保持器的采样	77
一、采样方法	77
二、系统的连续时间状态空间模型采样	80
三、引入虚拟采样开关的方法	81
第三节 具有时延时间系统的采样	82
第四节 s 域和 z 域的映射	85
第五节 系统脉冲传递函数的计算	87
第六节 数字控制器 $D(z)$ 的实现	91
一、并联程序法	91
二、迭代程序法	93
三、直接程序法	95
四、嵌套程序法	97
第七节 有限字长的影响	101
一、量化误差的统计特性	101
二、量化误差对系统输出的影响	102
三、量化误差对实现数字控制器 $D(z)$ 的动态影响	103
第八节 扰动和扰动模型	104
一、扰动的类型	105
二、简单扰动及其扰动模型	105
三、随机扰动模型	106
小结	108
思考和练习题 3	109
第四章 计算机控制系统的模拟化设计法	111
第一节 模拟调节器的离散化	112
一、常用的模拟调节器离散化方法	112
二、脉冲响应不变法	116
三、零、极点匹配法	118
四、各种离散化方法的比较	119
第二节 模拟调节器的离散等效设计原理	120
第三节 数字 PID 控制算法	123
一、数字 PID 控制算法的一般形式	124
二、数字 PID 算法的饱和效应和改进算法	127
三、其他几种 PID 改进算法	130

四、数字 PID 调节器的结构和参数选择	132
五、实现数字 PID 算法的保证措施	136
第四节 计算机前馈-反馈控制算法	139
一、计算机前馈-反馈控制系统	139
二、计算机前馈-反馈控制算法的步骤	140
三、前馈控制的一般设计原则	141
四、在线参数整定方法	141
第五节 计算机串级控制系统的控制算法	141
第六节 计算机解耦控制算法	144
一、相对增益分析法	144
二、解耦条件与解耦装置	147
三、计算机解耦控制算法步骤	150
小结	151
思考和练习题 4	152
第五章 直接数字设计法	153
第一节 最少拍系统的设计	153
一、最少拍设计数字调节器的可实现性与系统稳定性	155
二、最少拍系统的局限性	158
三、最少拍无纹波系统的设计	160
四、非最少有限拍系统的设计	162
第二节 最小均方误差的设计方法	164
第三节 最小能量控制系统的设计	168
第四节 达林算法	171
一、达林算法的提法与形式	171
二、振铃现象及其消除办法	172
小结	175
思考和练习题 5	176
第六章 基于状态空间法的极点配置设计法	177
第一节 几个概念与采样周期 T 的选择	177
一、广义对象的状态空间描述	177
二、几个有用的变换	178
三、采样周期的选择	182
第二节 基于状态反馈实现极点配置的调节器设计方法	184
一、反馈增益矩阵 K 的选择算法	185
二、无纹波响应设计	188
第三节 状态观测器的极点配置方法	191
一、状态观测器的算法	191
二、状态观测器算法的改进	192
三、观测器状态反馈增益矩阵 K_o 的确定	194

第四节 伺服系统的设计	199
一、具有状态反馈和积分控制的伺服系统极点配置设计方法	199
二、引入状态观测器对系统输出的影响	202
三、伺服系统的一般设计步骤	203
小结	209
思考和练习题 6	210
第七章 基于预测模型的控制方法	212
第一节 内部模型	213
第二节 内模控制系统的结构与性质	216
第三节 内模控制器的设计	219
一、按优化性能指标的控制器设计	219
二、基于参数模型的内模控制器设计	220
第四节 内模控制系统参数的选择	223
一、采样周期 T 的选择	224
二、输入滤波器 $G_r(z)$ 的 a_r 参数选择	224
三、可实现因子 $f(z)$ 的 β 参数选择	224
四、反馈滤波器 $G_f(z)$ 的 a_f 参数选择	225
第五节 动态矩阵控制算法	227
一、预测模型	227
二、优化性能指标和控制策略	228
三、反馈校正	229
第六节 动态矩阵控制算法的实现及参数选择	231
一、离线准备工作	231
二、DMC 算法的计算机实现	232
三、原始设计参数的选择	232
第七节 DMC 算法的一种实用形式——DMC - PID 串级控制	235
小结	237
思考和练习题 7	237
第八章 自校正控制系统设计方法	239
第一节 最小二乘参数估计算法	240
一、最小二乘参数估计的提法	240
二、最小二乘参数估计算法的求解	241
三、最小二乘参数估计的递推算法	242
四、初始值选择和计算步骤	243
五、具有指数遗忘的最小二乘递推算法	244
第二节 增广最小二乘估计算法	246
第三节 工程上实用的一种最小二乘估计算法形式	248
一、控制对象或过程的模型描述	248
二、具有指数遗忘的最小二乘递推算法	249

三、在线实现的注意要点	250
第四节 基于最小方差控制的自校正控制器的设计	251
一、最小方差预报律	252
二、最小方差控制律	253
三、自校正调节器的实现	254
第五节 基于广义最小方差控制的自校正控制器的设计	255
一、广义最小方差控制律	256
二、自校正控制器算法	257
第六节 实现自校正控制的几个问题	258
一、问题的提出	259
二、算法选择	260
三、系统分析和 n 、 d 、 T 的确定	260
四、实现自校正控制要解决的问题	261
小结	261
思考和练习题 8	262
第九章 计算机控制系统实例	263
第一节 直线电机的数字 PID 控制	263
一、概述	263
二、控制系统的组成	263
三、直线电机的数字 PID 控制和参数选择	264
四、直线电机数字 PID 控制系统软件	266
第二节 啤酒发酵罐的计算机控制系统	267
一、概述	267
二、发酵温度控制方案的确定	268
三、计算机测控管理系统的硬件组成	273
四、计算机测控管理系统的软件设计	277
五、系统的实际运行结果	278
第三节 辊道窑计算机自动控制系统	279
一、概述	279
二、单层辊道窑自动控制系统	279
三、辊道窑微机温度控制系统	279
第四节 炼油厂加氢裂化装置的动态矩阵控制	281
一、工艺过程	281
二、DMC 总体结构设计	281
三、预测模型	283
四、滚动优化目标函数	283
五、两种控制模式	283
六、控制效果	283
第五节 催化裂化分馏塔模型算法控制	284

一、工艺过程分析	284
二、模型算法控制设计	284
三、控制效果	284
参考文献	285

第一章 绪 论

第一节 概 况

20 世纪 40 年代逐渐发展和成熟起来的经典控制理论,是对简单回路控制系统进行系统分析、系统综合的有力工具,相应地,随模拟技术的发展而发展起来的模拟控制系统在逐步完善的同时,逐渐在许多工业部门占有相当重要的地位。现在,随着生产技术的不断发展,工业生产规模越来越大,生产过程的相关因素越来越复杂,自然对控制系统的要求越来越高,但模拟控制系统的进一步发展却受到了限制。例如,模拟控制系统的价格随控制回路数目的增加呈线性增长;难以用模拟控制器实现复杂的或有特殊要求的控制功能,难以满足越来越高的有关系统优化、最优工况以及可靠性等要求。

自 1959 年在美国某炼油厂首次成功应用 RW-300 计算机控制系统以来,随着现代控制理论和计算机技术的发展,特别是 1972 年出现微型计算机以及单片机以后,人们为了追求控制系统具有最优性能、最大的生产率、最高的效益、最小的成本或能耗,越来越多地在生产过程中使用数字计算机控制系统;与此同时,计算机控制理论和技术也得到了飞速的发展。

近年来,由于微型计算机和单片机已发展到适用于满足各种控制功能的需要,以至形成了这样的趋势,即使在小规模的控制系统中也要使用数字计算机以获得最好的系统控制性能。

数字计算机用作工业控制系统的一部分以构成计算机控制系统,经历了一个逐步发展的过程。许多学者一般将这一发展过程划分为三个阶段:

(1)开创期

1965 年以前的工作为开创期。这一时期的标志是实现数据自动测量和处理的开环计算机控制系统和工业装置中的直接数字控制(DDC)系统(即简单回路的计算机控制系统)。

(2)实用普及期

1965~1969 年是数字计算机控制系统的实用和逐步普及的阶段。在这期间,由于出现可靠性不断提高、价格逐年下降的小型数字计算机,因而它在生产中的应用得到了很大的发展,其标志是集中型的计算机控制系统,即用以控制整个生产过程或装置的多回路集中控制的系统。

(3)微型计算机的应用阶段

由于微型计算机和单片机所具有的高可靠性、价格相宜和使用方便灵活等特点,使得计算机的应用自 1972 年以来获得大量的推广,以至于不管应用的规模多么小,计算机控制都变成一种不可或缺的选择。这一时期的主要标志是利用系统工程方法实现集管理、控制于一体的集散控制系统;近年来,随着现场智能控制设备的发展和实现整个企业信息系统的需求驱动下应运而生的现场总线控制系统正处于突飞猛进的发展之中。

可以预料,随着计算机技术、控制理论,以及诸如通信技术、计算机网络、测量技术、数据库技术、软件接口和总线技术等相关技术的发展,数字计算机在控制系统中的应用不仅会越来越广泛地涉及社会生活的各个领域,而且会推动工业自动化发展到一个更高级的全新阶段。

第二节 计算机控制系统的一般概念

扼要地说,用数字计算机取代模拟控制系统中的模拟控制器,如图 1-1 所示,就构成了计算机控制系统。

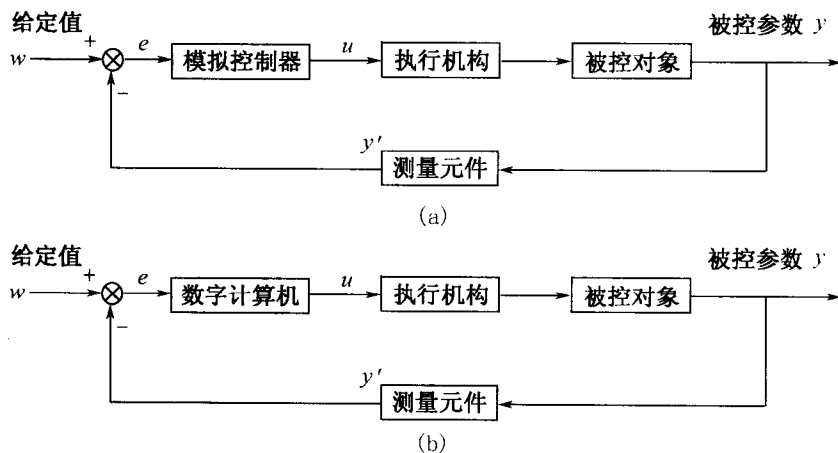


图 1-1

(a)模拟控制系统的一般结构形式;(b)计算机控制系统的一般结构形式

从图 1-1 可以看出,计算机控制系统的工作过程可理解为:为了控制被控参数 y ,首先要获取控制信号 u ,而 u 的获得又需先将给定量 w 和被控量 y 进行比较求得误差信号 e ,再由数字计算机对 e 进行处理以提供控制信号 u 。注意,物理量 y 、 u 和 e 是我们熟悉的连续模拟量,计算机运算操作的是二进制数字量。显然,与模拟控制系统控制的目的一样,它最终使系统误差 e 减少甚至趋向于零,使被控量 y 按某一性能趋向于给定值 w 。

由图 1-1 还可以看出,计算机控制系统虽从模拟控制系统演化而来,但因数字计算机是控制系统的一部分而有不同于模拟控制系统的特点。

首先,计算机控制系统由数字部件(即数字计算机)和模拟部件(即被控过程)所组成。从信息的观点分析,它有两种不同类型的信号:一是我们熟悉的时间连续的模拟信号,二是因数字计算机引进的二进制表示的数字信号。显然,计算机控制系统中存在模拟信号和数字信号的相互转换。

其次,按照(模拟信号和数字信号相互转换的)信号转换技术(见第二章),图 1-1b 可以表示为如图 1-2 所示的系统一般结构形式。这样,计算机控制系统的控制过程可描述如下:

①只有在采样开关闭合(即采样)的 kT 时刻,才对系统误差 $e(t)$ 的瞬时值进行检测,也就是将整量化了的数字量 $e(kT)$ 输入给计算机(数字控制器)。这一过程称为实时采集

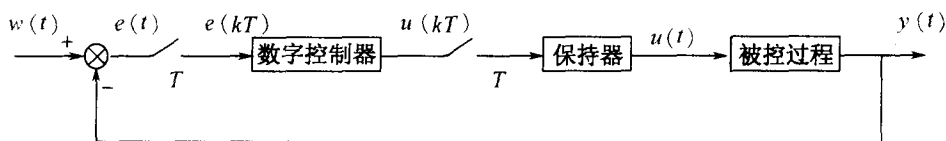


图 1-2 计算机控制系统的一般结构图

数据。

②计算机对所采集的数据 $e(kT)$ 进行处理，即依给定的控制规律(数字控制器)确定该 kT 采样时刻的数字控制量 $u(kT)$ 。这一过程称为实时决策。

③将 kT 采样时刻决策给出的数字控制量 $u(kT)$ 转换为 kT 时刻生效的模拟控制量 $u(t)$ 控制被控对象。这一过程称为实时控制。

注意，这里指的“实时”，均指采样开关闭合这一时刻。换言之，只有在采样开关闭合这一时刻，计算机控制系统才构成反馈系统；在非采样时刻，被控对象仅仅工作在开环系统状态，即在 kT 至 $(k+1)T$ 时刻之间，被控对象只受到 kT 时刻生效的控制量 $u(t)$ 驱动控制。

计算机控制系统这一特点意味着，一方面必须注意采样周期 T (每隔时间 T 采样开关闭合一次) 的正确选择，应使计算机在实时决策时占用的时间尽可能短即应远远小于采样周期 T ，才能保证控制系统的性能，否则不但不能实现实时控制，反而会恶化控制系统的性能；另一方面，之所以会出现计算机控制系统逐渐取代模拟控制系统的倾向，就在于通过计算机语言便于编制各种不同实时决策的应用程序，使得计算机可以实现模拟控制器难以实现的各种复杂或特殊控制规律。换言之，计算机具有强大的潜在实时决策和实时控制能力。

现阶段的工程实践中，为了对计算机控制系统进行系统分析和系统综合，通常采用如下两种方法：从信息观点出发，在图 1-2 的比较器处断开，可得如图 1-3a 所示的输入/输出均为模拟信号的情况，这时，控制工程师可以用自己熟悉的模拟控制理论来分析综合满足某一性能指标的模拟控制器，然后将之离散化即用计算机来实现，这种设计方法称为模拟化设计方法(见第四章)；但若在图 1-2 的保持器前断开，则得图 1-3b 所示的输入/输出均为数字信号的情况，这时，控制工程师习惯于用 Z 变换理论来分析综合满足某一性能指标的数字控制器，这种设计方法称为直接数字设计方法。

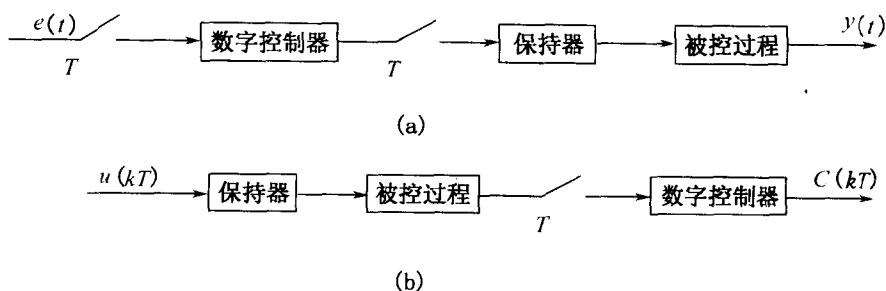


图 1-3 计算机控制系统信息流通示意图

应该指出的是，这里所指的计算机控制系统是将数字计算机与生产现场设备直接连接所构成的系统。这种系统的运行方式又称为“联机”方式或“在线”方式。换言之，只有

“在线”运行方式的计算机控制系统才能实现对被控对象的实时控制；反之，凡是通过中间介质如磁带、磁盘或穿孔卡等与生产现场设备发生联系的所谓“离线”方式，都不能实现对被控对象的实时控制。

第三节 计算机控制系统的分类和发展

计算机控制系统的物理实现，不仅与要控制的生产过程的复杂程度和不同控制、管理要求有关，而且与计算机技术、通信技术和数据库技术的发展、甚至与智能化设备的发展水平有关，因此，计算机控制系统可以按系统的应用功能分类，也可以按控制系统的结构特点分类，甚至可以按信息综合集成的特点分类。下面首先介绍按系统的应用功能的分类。

1. 数据采集和处理系统

尽管数据采集和数据处理系统不属于自动控制意义下的系统，但一个计算机控制系统却离不开数据采集和处理的功能。

计算机数据采集和处理系统的一般结构如图 1-4 所示。

这种应用方式，主要是通过过程输入通道对生产现场的过程参数进行巡回检测，并对所记录的数据进行数值判断和计算、数据统计和整理，以及数据超限报警和数据显示等处理。因此，这类系统中的计算机主要功能不是直接参与生产过程的控制，而是利用计算机对采集数据和处理数据的高速性能以及存贮信息和逻辑判断

的能力，实现对整个生产过程的集中监督，指导生产过程的控制操作，如根据巡回检测的过程参数和过程工况，利用模拟控制装置按需要组合相适应的控制系统；此外，它也可以对所积累的采集数据进行数学统计，进而抽象出被控对象的数学模型，以利于实现最优的控制决策。

2. 直接数字控制系统(DDC)

直接数字控制系统的一般结构如图 1-5 所示。由图可见，它实际上就是图 1-2 所示系统的一般结构图。由于这类控制系统通常只具有一个或若干个输入量/控制量，因此，习惯上称这类系统为简单回路的计算机控制系统。

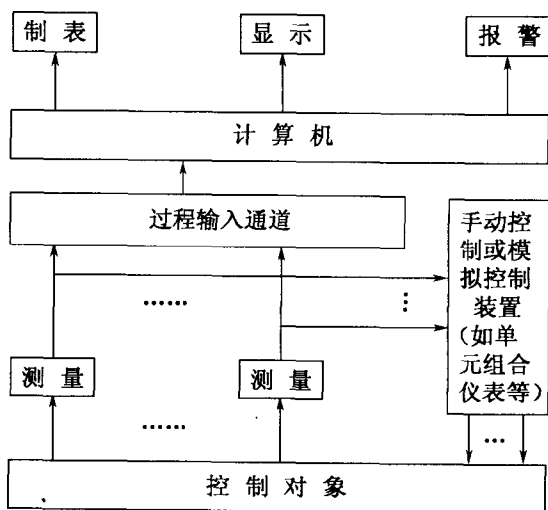


图 1-4 计算机数据采集和处理系统的一般结构

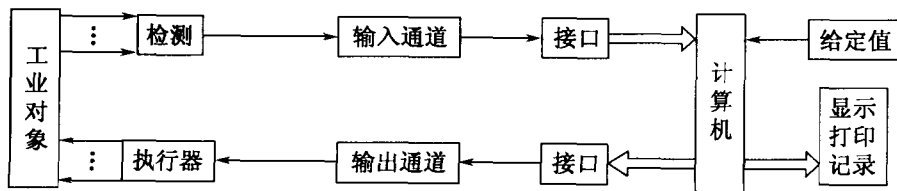


图 1-5 直接数字控制系统的一般结构

顾名思义,直接数字控制系统或简单回路计算机控制系统中的计算机直接参与生产过程的控制。具体地说,它首先通过输入通道检测被控对象参数,然后依给定值和某一控制规律对所测参数进行加工处理,加工结果(控制量)通过输出通道提供给受控对象,使被控参数的变化过程符合某一性能指标的规范要求。

应该指出,在这一应用方式中,计算机除具有数据采集与处理功能外,还可以利用其本身的分时操作功能,同时用作多个简单回路的数字控制器或取代多台模拟控制器的功能。它所能实现的控制规律,不管是简单的还是复杂的(或特殊的),都是通过计算机语言和/或一种或几种计算机语言通过软件接口技术形成的应用程序来实现的。

3. 监督控制系统(SCC)

监督控制系统的一般结构如图 1-6 所示。可以看出,它是在简单回路控制系统的基础上增加了一台给若干简单回路控制系统提供给定值和对控制过程进行监督的计算机。

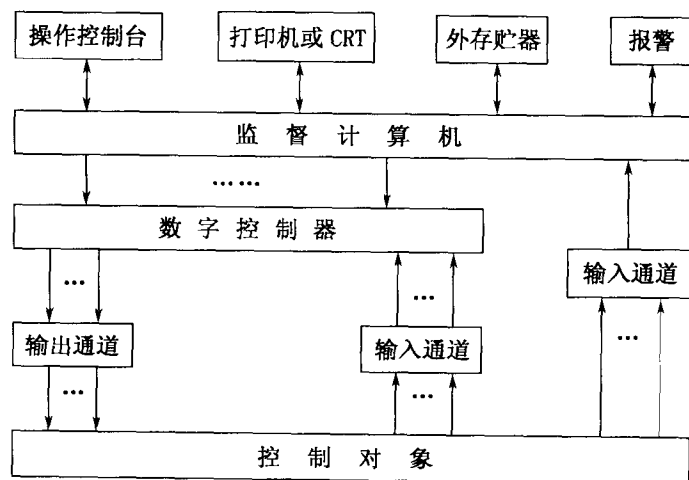


图 1-6 监督控制系统的一般结构图

图中所示的监督计算机,通常是根据原始生产工艺信息和从输入通道采集数据加工处理的结果,按照描述该生产过程的数学模型,自动地改变或修正各简单回路控制系统的给定值,从而使生产过程始终处在最优的生产工况状态中。

这种动态地提供给定值的应用方式,也称为给定值控制。

要注意的是,这种应用方式的控制效果,主要取决于描述该生产过程的数学模型的优劣。实际上,该数学模型一般是针对某一目标函数设计的。如果该数学模型能使相应的目标函数达到最大值状态,则认为它是能实现生产工况的最优控制;反之,控制效果就不理想。由于监督计算机通过简单回路控制系统与生产过程相联接,因此,它属于“离线”方式。然而,正是这一“离线”方式,才使它有可能实现生产过程的各种复杂规律的控制。

4. 分级控制系统

分级控制系统是在监督控制系统的基础上,利用通信技术和 CRT 显示技术组构的系统,如图 1-7 所示。

由图可以看出,它不仅具有对生产过程的控制和监督功能,而且还有包括工厂一级和/或企业一级的集中监督和管理决策的功能,如生产管理,情报、计划调度,甚至产品订购、运输等功能。

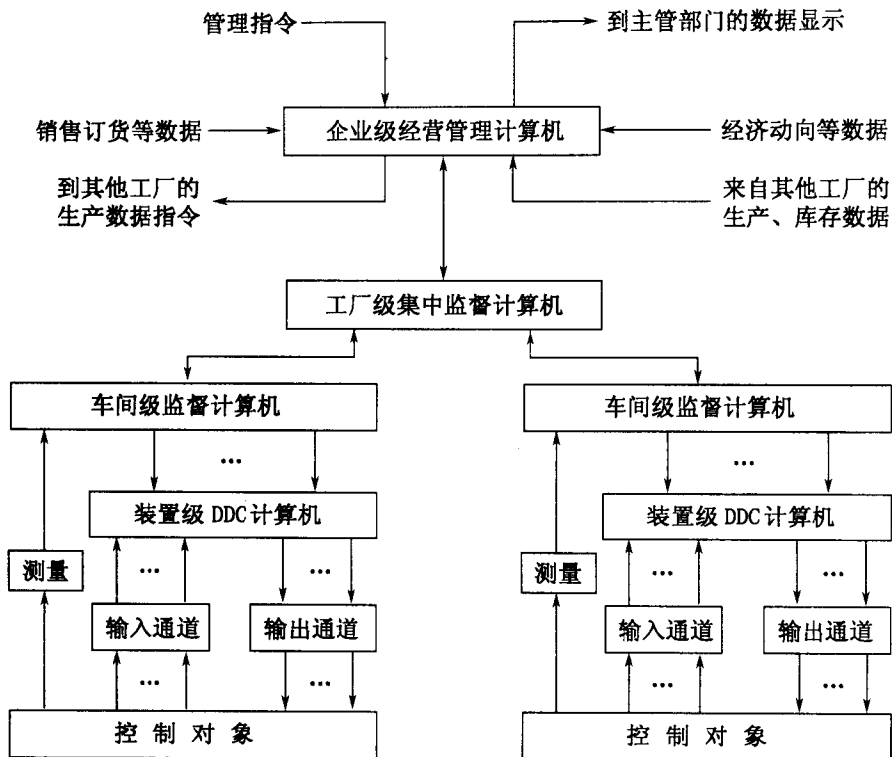


图 1-7 分级控制系统的一般结构图

分级控制系统也可称为计算机控制管理系统。利用计算机网络技术和数据库技术，它已发展为近年来正在研究和推广的柔性制造系统。

5. 分布式计算机控制系统

分布式计算机控制系统的结构特征是：利用微型计算机或微处理器为核心的基本控制器，实现地理上和功能上的分散控制，同时通过高速数据通道将各个分散点的信息集中起来进行集中监督、管理和控制操作，以实现生产过程的各种复杂的控制规律。其一般结构如图 1-8 所示。

基于通信技术和总线技术，显然它的系统结构类似于微处理器的单总线结构。因此，除了易实现各种复杂控制规律外，它的其他突出优点是：系统结构可大可小，易扩充，系统可靠性高，以及因引入 CRT 显示技术和智能操作台使控制、监督操作十分方便，等等。

这是一种仍有发展前途的计算机控制系统。

综观上述介绍可以看出，若从计算机控制系统结构特点分析，又可将控制系统分为窄义结构的控制系统——简单回路控制系统（如图 1-5 所示）、广义结构的控制系统——集

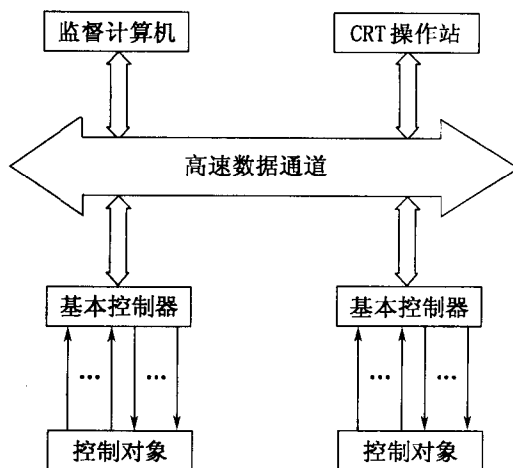


图 1-8 分布式计算机控制系统一般结构图