



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

计算机控制系统 (第2版)

康 波 李云霞 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

计算机控制系统

(第2版)

康 波 李云霞 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书依据控制学科本科自动化专业“计算机控制系统”课程教学大纲编写,系统地介绍计算机控制系统的基本原理、分析与设计方法及有关工程实现技术,主要内容为:理论基础,包括计算机控制系统基本概念、计算机控制系统的信号变换与计算机控制系统的数学描述等;计算机控制系统的经典分析与设计方法,包括基于 z 传递函数分析方法、基于连续系统理论的数字控制器设计与 z 域直接设计等;计算机控制系统的状态空间分析与设计方法;分级分布式计算机控制系统与计算机数值控制系统;计算机控制系统的设计与实现。本书提供电子课件与部分习题解答。

本书可作为高等学校自动化、电气工程、仪器仪表、计算机应用及机电一体化等相关专业的本科生或研究生教材,也可作为有关工程技术人员的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统 / 康波, 李云霞编著. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2015.2

ISBN 978-7-121-25461-1

I. ①计… II. ①康… ②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(2015)第021717号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 王 崧

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.75 字数: 600千字

版 次: 2011年1月第1版

2015年2月第2版

印 次: 2015年2月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

计算机控制系统是随着计算机技术与相关控制理论的发展而不断发展起来的,并已广泛应用于社会生产与日常生活等各领域。计算机控制已成为控制与自动化系统的主要方式。对计算机控制系统的分析与设计涉及与计算机控制相关的基础理论、分析与设计方法及工程实现技术等各方面的内容。

本书重点针对大学本科自动化专业及其他相关专业对“计算机控制系统”课程的教学要求进行编写。结合本科生的知识背景与教学特点,在教材内容的安排上既注重内容的完整性与系统性,还力求深入浅出、循序渐进、易于理解,同时通过合理安排例题和习题,有效地帮助学生熟练掌握相关的基础知识与基本方法。

本书系统地阐述计算机控制系统的基础理论、常规分析与设计方法以及工程实现技术等相关内容。第1章介绍计算机控制系统的基本概念、基本组成原理、主要类型与发展情况等;第2~3章为计算机控制系统的基础理论,阐述计算机控制系统中的信号变换理论与计算机控制系统的数学描述,包括差分方程描述、 z 传递函数与离散状态空间描述等;第4章讨论计算机控制系统的经典分析方法,即基于 z 域的分析方法;第5~6章介绍计算机控制系统的经典设计方法,包括基于连续系统理论的设计与 z 域直接设计等两大类方法;第7~8章系统地讨论计算机控制系统的状态空间分析方法与设计方法;第9章简要介绍目前在工业控制领域应用较为广泛的分级分布式控制原理及其两种典型应用形式,即集散控制系统与现场总线控制系统;第10章介绍计算机数值控制基本原理与方法;第11章重点介绍计算机控制系统工程设计与实现的一般方法与相关问题。

本书作为本科自动化专业教材,内容全面,系统性强,既注重基本理论的理解与掌握,也强调具体工程实现技术的实践。读者通过本教材的学习,可以较为全面地掌握计算机控制系统的基本理论,并能够对相关的计算机控制系统进行分析、设计与具体实现。在教学学时许可的情况下(如64学时),可讲授教材的全部内容;如学时较少,可重点讲授第1~8章及第11章部分内容,其余为课外自学。对于其他相关专业,如电气工程及自动化、仪器仪表、计算机应用等,可根据各自教学要求,适当选取教材相关章节作为主要教学内容,通常可选择第1~6章及第11章的相关内容。对于具有工业控制或数控技术背景的专业或教学需求,可适当增加第9章或第10章的相关内容。此外,本教材也可作为相关专业工程硕士的教材或参考书。

本书向使用本书作为教材的高校教师提供配套电子课件和部分习题参考答案,请登录华信教育资源网<http://www.hxedu.com.cn>注册下载。

本书第1版自2011年出版以来,在编者所在学校及数十所高校作为“计算机控制系统”课程教材使用,取得了较好的效果,得到了广大师生的好评。同时,也有部分热心读者和同学指出了本书存在的一些笔误,或对不妥之处提出了疑问。第2版修订在知识体系及章节安排上总体保持了第1版的框架,主要针对部分章节的内容进行了改写、调整或适当补充,使得内容安排与相关论述上更具条理性与系统性,同时对部分章节的例题与习题进行了调整与增补,使之与相关知识点更紧密结合,更利于读者理解与巩固相关知识。此外,还针对第1版中出现的一些笔误与不妥之处进行了修订。

本书是在作者所在的电子科技大学计算机控制系统教学团队近20年来教学实践的基础上编写的。本书的主要编写人员多年来在计算机控制系统的教学与实际工程应用方面均积累了一定的实践经验,并力图在教材的编写思想与具体内容方面有所反映。本书由康波与李云霞共同编写。康波具体负责编

写了第1、2、7、8、10、11章的全部内容及第4章、第6章的部分内容，并统编全书；李云霞具体负责编写了第3、5、9章的全部内容及第4章、第6章的部分内容。作者所在教研室的有关教师和研究生的也参与了本书的例题、习题资料的整理与相关图表的绘制工作。

在本书编写过程中，编者参考了大量与计算机控制理论相关的教材与专著，从中得到不少启发，为本书的编写提供了一定的支撑，编者对这些参考文献的作者表示感谢。特别地，编者还要对指出本书第1版出现的笔误或不妥之处的热心读者表示衷心感谢。同时，在本书的编写过程中还得到了电子工业出版社相关领导与编辑的大力支持，在此一并致以谢意。

由于编者的知识水平与经验有限，书中的错误与不妥之处在所难免，期望得到读者的批评指正。

作 者

2015年2月

目 录

第1章 绪论	1	2.3 信号的恢复与重构	24
1.1 计算机控制系统概述	1	2.3.1 信号的理想恢复过程	24
1.1.1 计算机控制系统的一般概念	1	2.3.2 信号的非理想重构过程	26
1.1.2 计算机控制系统的主要特点	3	2.3.3 零阶保持器	26
1.2 计算机控制系统的组成	4	2.3.4 后置滤波	28
1.2.1 计算机控制系统的硬件组成	4	2.4 信号的量化	28
1.2.2 计算机控制系统的软件组成	5	本章小结	29
1.3 计算机控制系统的典型应用形式	5	习题与思考题	30
1.3.1 数据采集与操作指导系统	5	第3章 计算机控制系统的数学描述	31
1.3.2 直接数字控制系统	6	3.1 z 变换理论	31
1.3.3 监督计算机控制系统	6	3.1.1 z 变换的定义	31
1.3.4 计算机分级分布式控制系统	7	3.1.2 z 变换的方法	32
1.3.5 数据采集与监督控制系统	8	3.1.3 z 变换的性质和定理	35
1.3.6 现场总线控制系统	9	3.1.4 z 反变换	37
1.4 计算机控制系统的发展概况	10	3.1.5 广义 z 变换	40
1.4.1 计算机控制系统的发展历程	10	3.2 线性定常离散系统的差分方程	42
1.4.2 计算机控制系统的发展趋势	11	3.2.1 线性定常离散系统差分方程的 一般形式	42
1.5 计算机控制系统的理论与设计问题	12	3.2.2 线性定常差分方程的求解	42
1.5.1 计算机控制系统的理论问题	12	3.3 z 传递函数	43
1.5.2 计算机控制系统的设计问题	13	3.3.1 z 传递函数的概念	43
本章小结	14	3.3.2 z 传递函数与差分方程的关系	44
习题与思考题	14	3.3.3 开环 z 传递函数	44
第2章 计算机控制系统的信号变换	15	3.3.4 闭环 z 传递函数	47
2.1 模数变换与数模变换	15	3.3.5 计算机控制系统的输出响应计算	48
2.1.1 信号类型	15	3.4 离散状态空间描述	49
2.1.2 A/D转换器	16	3.4.1 线性定常离散系统的状态空间 模型的建立	49
2.1.3 D/A转换器	17	3.4.2 连续状态方程的离散化	55
2.1.4 A/D转换与D/A转换对系统性能 的影响	18	3.4.3 计算机控制系统的闭环状态方程	58
2.2 采样过程的数学描述及特性分析	18	本章小结	59
2.2.1 采样过程的一般描述	18	习题与思考题	59
2.2.2 采样开关的数学描述	19	第4章 计算机控制系统的经典分析方法	62
2.2.3 采样信号的时域描述	20	4.1 计算机控制系统的稳定性分析	62
2.2.4 采样信号的频域描述与频域特性	21	4.1.1 s 平面与 z 平面的关系	62
2.2.5 采样定理	22		

4.1.2	线性离散系统的稳定条件	64	5.2.8	各种离散化方法比较	107
4.1.3	线性离散系统稳定性的判断	66	5.3	数字控制器设计举例	107
4.1.4	采样周期对计算机控制系统 稳定性的影响	71	5.4	数字 PID 控制	110
4.2	计算机控制系统稳态误差分析	73	5.4.1	PID 控制的基本形式及数字化	111
4.2.1	离散系统稳态误差的定义	73	5.4.2	数字 PID 控制算法	113
4.2.2	线性定常离散系统稳态误差 的计算	73	5.5	数字 PID 控制改进算法	114
4.2.3	干扰作用下的稳态误差	77	5.5.1	抗积分饱和算法	114
4.2.4	A/D 转换器对稳态误差的影响	77	5.5.2	微分算法的改进	115
4.2.5	采样周期对稳态误差的影响	78	5.6	数字 PID 控制参数整定	119
4.3	计算机控制系统的响应特性分析	79	5.6.1	扩充临界比例系数法	119
4.3.1	计算机控制系统的阶跃响应分析	80	5.6.2	扩充响应曲线法	120
4.3.2	系统闭环极点分布与响应特性	82	5.6.3	试凑法	120
4.4	z 平面根轨迹分析法	84	5.7	史密斯预测补偿控制	121
4.4.1	z 平面根轨迹绘制	84	5.7.1	史密斯补偿原理	121
4.4.2	z 平面根轨迹分析	86	5.7.2	纯滞后补偿的数字实现	123
4.5	线性定常离散系统的频率特性 分析法	87	本章小结		124
4.5.1	线性定常离散系统频率特性 绘制方法	87	习题与思考题		125
4.5.2	线性定常离散系统频率特性 分析方法	90	第 6 章	数字控制器 z 域直接设计方法	126
本章小结		92	6.1	基于 z 传递函数设计的基本原理	126
习题与思考题		92	6.1.1	数字控制器 $D(z)$ 的一般形式	126
第 5 章	基于连续系统理论的数字控制器 设计	94	6.1.2	对期望闭环传递函数 $\Phi(z)$ 的约束	127
5.1	基于连续系统理论的数字控制器 设计基本原理	94	6.1.3	基于 z 传递函数设计一般步骤	128
5.1.1	连续域离散化设计基本思想	94	6.2	最少拍控制系统设计	129
5.1.2	等效控制器 $D_c(s)$ 的数学描述	94	6.2.1	特殊对象的最少拍控制系统 设计	129
5.1.3	数字控制器的设计步骤	96	6.2.2	一般对象的最少拍控制系统 设计	133
5.2	连续控制器的离散化方法	96	6.3	最少拍无纹波控制系统设计	136
5.2.1	脉冲响应不变法 (z 变换法)	96	6.4	最少拍控制系统的改进设计	139
5.2.2	阶跃响应不变法	97	6.4.1	惯性因子法	139
5.2.3	前向差分法	98	6.4.2	非最少的有限拍控制	139
5.2.4	后向差分法	100	6.5	扰动作用下最少拍控制系统设计	140
5.2.5	双线性变换法	102	6.5.1	针对扰动作用的设计	140
5.2.6	预修正双线性变换法	105	6.5.2	抑制扰动作用的设计	141
5.2.7	零极点匹配法	106	6.6	大林算法设计	143
			6.6.1	大林算法基本原理	143
			6.6.2	大林算法数字控制器的一般 形式	144
			6.6.3	振铃现象的消除方法	146

6.7 复合控制系统设计.....	148	习题与思考题.....	188
6.7.1 反馈控制中的扰动作用.....	148	第8章 计算机控制系统的状态空间设计.....	190
6.7.2 复合控制系统基本形式与设计 步骤.....	148	8.1 状态反馈设计.....	190
6.8 z 平面根轨迹设计.....	151	8.1.1 状态反馈系统结构及其特性.....	190
6.9 数字控制器的频域设计.....	153	8.1.2 状态反馈与极点配置.....	192
6.9.1 w 变换.....	153	8.1.3 单输入系统状态反馈极点配置 设计.....	193
6.9.2 基于 w 变换的频域设计法.....	155	8.1.4 多输入系统状态反馈极点配置 设计.....	196
本章小结.....	159	8.1.5 有限拍控制.....	197
习题与思考题.....	159	8.2 输出反馈设计.....	197
第7章 计算机控制系统的状态空间分析.....	161	8.2.1 输出反馈的结构形式与特点.....	198
7.1 离散状态方程的解.....	161	8.2.2 输出反馈与极点配置.....	199
7.1.1 递推法.....	161	8.3 状态观测器设计.....	200
7.1.2 z 变换法.....	163	8.3.1 开环状态观测器.....	200
7.2 z 传递函数矩阵与特征方程.....	164	8.3.2 闭环状态观测器设计.....	201
7.2.1 矩阵的特征值.....	164	8.3.3 降维观测器设计.....	206
7.2.2 z 传递函数矩阵.....	165	8.3.4 有限拍观测器.....	207
7.2.3 离散系统的特征方程.....	165	8.4 带状态观测器的状态反馈设计.....	208
7.3 李亚普洛夫稳定性分析.....	167	8.4.1 带观测器的状态反馈控制系统的 一般结构.....	208
7.3.1 李亚普洛夫意义下的稳定性 概念.....	167	8.4.2 带观测器的状态反馈控制系统设计 的分离性原理.....	209
7.3.2 李亚普洛夫第二法主要定理.....	168	8.4.3 带观测器的状态反馈控制系统 设计原则.....	210
7.3.3 线性定常连续系统渐近稳定 判据.....	170	8.4.4 带观测器的状态反馈控制系统 的控制器.....	210
7.3.4 离散时间系统李亚普洛夫稳定性 判据.....	170	8.4.5 设计举例.....	212
7.4 可控性与可观性.....	174	本章小结.....	215
7.4.1 可控性.....	174	习题与思考题.....	215
7.4.2 输出可控性.....	177	第9章 分级分布式计算机控制系统.....	218
7.4.3 可观性.....	178	9.1 分级分布式计算机控制系统基本 原理.....	218
7.4.4 可控性、可观性与 z 传递函数 的关系.....	181	9.1.1 分级分布式计算机控制系统 的产生.....	218
7.4.5 采样系统可控可观性与采样周期 的关系.....	182	9.1.2 分级分布式计算机控制系统的 组成原理.....	220
7.5 可控标准型与可观标准型.....	183	9.1.3 分级分布式计算机控制系统 的评价.....	222
7.5.1 z 传递函数与可控标准型.....	183	9.2 集散控制系统.....	223
7.5.2 z 传递函数与可观标准型.....	184		
7.5.3 通过线性变换构造可控标准型.....	184		
7.5.4 通过线性变换构造可观标准型.....	186		
本章小结.....	187		

9.2.1 集散控制系统的概念和特点	224	11.2.3 开关量(数字量)输入通道	282
9.2.2 集散控制系统的层次结构	225	11.2.4 开关量(数字量)输出通道	284
9.2.3 集散控制系统的基本控制器	227	11.3 数字信号调理	285
9.2.4 集散控制系统的数据通信	228	11.3.1 数字滤波	285
9.2.5 集散控制系统的组态原理	230	11.3.2 非线性补偿	287
9.2.6 集散控制系统的发展概况	234	11.3.3 标度变换	288
9.3 现场总线控制系统	235	11.4 数字控制器算法设计与实现	289
9.3.1 现场总线控制系统概述	235	11.4.1 计算延时与控制算法设计	289
9.3.2 现场总线控制系统的体系结构	237	11.4.2 数字控制器 $D(z)$ 的算法设计 与实现	291
9.3.3 现场总线控制系统与集散控制 系统的比较	238	11.4.3 状态空间描述控制器算法设计 与实现	296
9.3.4 几种典型的现场总线	239	11.4.4 控制算法中比例因子的设置	298
本章小结	245	11.5 量化效应分析	298
习题与思考题	246	11.5.1 计算机控制系统中量化误差 来源	299
第10章 计算机数值控制系统	247	11.5.2 变量的量化误差分析	300
10.1 计算机数值控制基础	247	11.5.3 参数的量化误差分析	302
10.1.1 计算机数值控制的基本概念	247	11.5.4 量化效应的非线性分析	304
10.1.2 数值控制基本原理	248	11.6 采样周期选择	307
10.1.3 计算机数值控制系统一般组成	249	11.6.1 采样周期选择的一般考虑	307
10.1.4 计算机数值控制系统的控制 结构	250	11.6.2 采样周期选择的经验规则	309
10.1.5 数值控制系统的控制方式	251	11.7 计算机控制系统的抗干扰技术	310
10.2 逐点比较法插补原理	251	11.7.1 干扰源	310
10.2.1 逐点比较法直线插补原理	251	11.7.2 干扰的作用形式	311
10.2.2 逐点比较法圆弧插补原理	255	11.7.3 串模干扰的抑制	312
10.2.3 八方向逐点比较法线性插值	260	11.7.4 共模干扰的抑制	313
10.3 步进电机的控制技术	261	11.7.5 长线传输干扰的抑制	314
10.3.1 步进电机工作原理	261	11.7.6 电源系统的抗干扰措施	314
10.3.2 步进电机的计算机控制	263	11.7.7 接地系统的抗干扰措施	315
本章小结	267	11.8 计算机控制系统的可靠性设计	316
习题与思考题	268	11.8.1 计算机控制系统可靠性设计的 一般原则	317
第11章 计算机控制系统的设计与实现	269	11.8.2 计算机控制系统的硬件可靠性 设计	317
11.1 计算机控制系统的设计原则 与步骤	269	11.8.3 计算机控制系统的软件可靠性 设计	319
11.1.1 计算机控制系统设计的 一般原则	269	本章小结	322
11.1.2 计算机控制系统的设计步骤	271	习题与思考题	322
11.2 过程输入/输出通道设计	274	参考文献	324
11.2.1 模拟量输入通道	274		
11.2.2 模拟量输出通道	280		

第1章 绪 论

自 1946 年第一台电子计算机问世以来, 计算机技术便逐渐成为影响现代科学技术发展的重要因素, 并在科学技术、社会生产与日常生活等各个方面引起了一场深刻的革命。工业控制领域是较早应用计算机技术的一个重要领域。计算机的产生与发展, 不仅是对传统控制技术的重要变革, 加速了工业自动化进程, 同时也有力地促进了现代控制理论的发展与实际应用。计算机控制系统已成为现代自动化技术的重要内容与具体形式。本章将简要介绍计算机控制系统的有关基本概念、组成、典型应用类型及其所涉及的基本理论问题。

1.1 计算机控制系统概述

计算机控制系统作为计算机在工业控制工程中的重要应用形式, 与传统的非计算机控制系统相比有何异同或优势? 本节将从计算机控制系统的基本概念出发来回答这个问题。

1.1.1 计算机控制系统的一般概念

计算机控制系统是在自动控制理论与计算机技术的基础上发展起来的, 因此, 计算机控制系统的相关概念与传统的自动控制系统是密切相关的。

一般而言, 自动控制系统就系统的结构形式而言, 主要可归纳为两类, 即开环控制系统与闭环控制系统, 如图 1.1 所示。

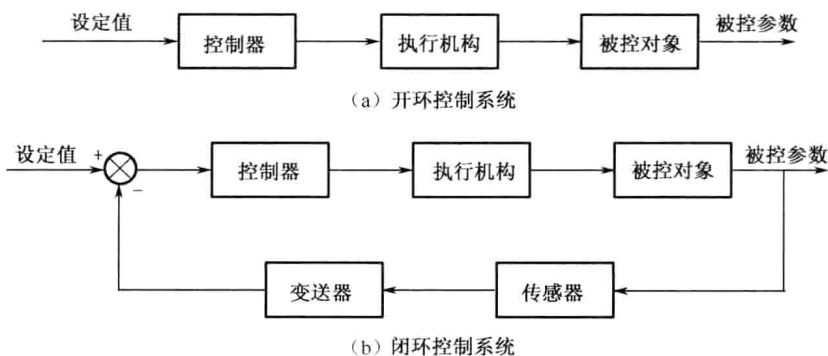


图 1.1 控制系统的一般结构

图1.1(a)为开环控制系统, 其控制器根据输入的指令信号, 依据事先确定的控制规律, 产生相应的控制信号, 直接控制执行机构或被控对象工作。开环控制系统结构简单, 所能实现的控制动作或控制策略也相对单一, 其控制性能相对较差。开环控制结构一般要求被控过程的物理特性、运行规律及其相应的控制策略均简单、明确, 且系统不存在扰动或扰动事先已知, 因此不适合于复杂和高精度的被控过程。

与开环控制结构不同, 图 1.1(b)所示的闭环控制结构通过测量元件对被控对象的被控参数进行测量, 由变送器将被测参数转换成相应的电信号, 并反馈到控制器的输入端, 与系统的给定值 (即参考

输入或期望输出)进行比较,控制器根据给定值与反馈值之间的偏差情况产生相应的控制信号来驱动执行机构工作,以使被控参数的值与给定值保持一致。与开环控制系统相比,引入负反馈的闭环控制系统不仅具有更好的控制精度,而且能够有效克服闭环系统内有关扰动对系统输出的影响。因此,闭环控制结构是自动控制系统的主要形式。

尽管绝大部分控制系统均采用了闭环控制结构,而开环控制结构由于简单且易于实现,仍然有相应的应用领域。因此,计算机控制系统也同样有开环控制与闭环控制两种基本结构。如图 1.2 所示,不论是开环还是闭环形式,所谓计算机控制系统,就是由计算机去取代传统控制系统中控制器的相关功能。由于计算机的输入和输出均为数字信号,而被控对象的被控参数及执行机构的输入信号一般为模拟量,因此,需要设置将模拟信号转换为数字信号的 A/D 转换器,以及将数字信号转换为模拟信号的 D/A 转换器。

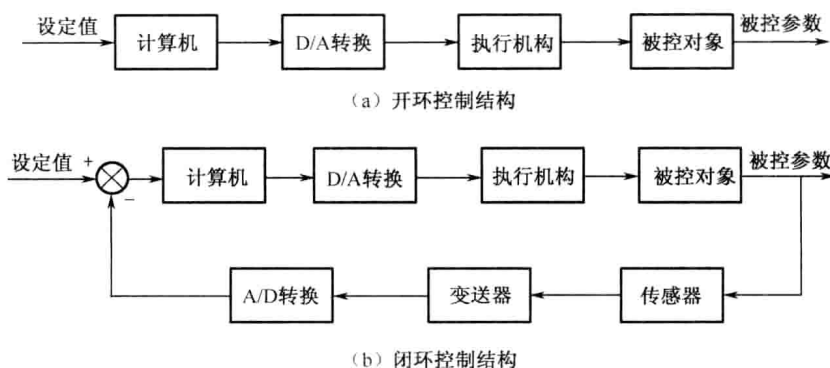


图 1.2 计算机控制系统

对于大部分计算机控制系统,其被控过程通常为连续时间系统,因此,需要经过对连续信号的采样过程,将连续信号离散化,以便计算机对其进行处理,这样的系统也称为采样控制系统。可见,采样控制系统中包含了各种不同类型的信号。严格说来,这与仅处理离散时间数值序列的离散时间系统是有区别的,但是,对于一般的采样控制系统,在大多数情况下,只描述系统在采样时刻的行为就足够了,此时,采样控制系统就可等同于离散时间系统来处理。因此,离散时间系统的相关理论也就是计算机控制系统的一个重要基础。

由于引入了计算机与数字信号,计算机控制系统的控制过程可以归结为以下三个基本步骤:

- (1) 实时数据采集。对被控参数进行实时检测,并输入计算机。
- (2) 实时决策。对采集到的数据进行实时处理、分析,并按事先确定的控制规律,决定需要采取的控制策略与控制信号。
- (3) 实时控制。根据控制决策,实时地向执行机构发出控制信号。

以上三个步骤按顺序执行,并不断循环,从而使整个系统按照一定性能指标的要求进行工作,同时对系统有关异常现象及时做出处理,以达到预期的控制目标。

传统的连续控制系统从控制原理角度分析,也可分为信号输入、处理与决策、控制信号输出三个步骤。由于其控制器由模拟电路构成,一般不存在计算延迟与传输延迟,所有步骤均可认为是瞬时完成的,并连续不断地工作,因此,三个步骤在时间上先后顺序不明显,一般认为是同时进行的。

对于计算机控制系统,由于控制过程中的每一个步骤均需要计算机参与完成,计算机处理总需要一定的时间,因此,上述三个步骤在时间上有明确的先后顺序。同时,由于每个步骤均需要一定的计

算机处理时间,这样从信号的输入到控制作用的产生就会有一定的延迟时间,为了达到期望的控制效果,这个延迟时间必须足够小,即要求“实时”。这里的所谓“实时”,就是指信号的输入、分析与处理和输出控制都要在一定的时间内完成,即计算机对信号的采样与处理要有足够快的处理速度,并在一定时间内做出反应或实施控制,超出这个时间,就会失去控制的有效时机,控制也就失去了意义。实时的具体度量与具体的被控过程密切相关。比如一个高炉炼钢的炉温控制系统,其控制的延迟时间一般为秒级,仍被认为是实时的;而对于一个导弹跟踪控制系统,当目标状态发生变化时,一般必须在毫秒级甚至更短的时间内做出反应,否则就不能命中目标。

计算机用于控制系统,可以有“在线”与“离线”两种方式。计算机直接连接到控制系统中,即计算机直接与生产过程的设备相连,并进行相应的输入/输出及决策操作,称为“在线”方式或“联机”方式;计算机不直接控制生产过程设备,而是通过中间记录介质,靠人工进行联系并进行相应操作的方式,称为“离线”方式或“脱机”方式。显然,离线方式不能对被控系统进行实时控制,一个实时控制系统必定是在线系统,但一个联机系统则不一定是实时控制系统。

1.1.2 计算机控制系统的主要特点

相对于传统的连续控制系统而言,计算机控制系统主要具有以下特点:

(1) 计算机控制系统既包含有计算机等数字部件,一般又包含连续的模拟部件(如绝大多数被控对象、执行部件、测量部件等),同时还包含相应的信号变换装置(如A/D与D/A转换器等),因此,计算机控制系统通常为模拟与数字部件的混合系统。

(2) 在连续控制系统中,各点信号均为连续的模拟信号,而在计算机控制系统中,除连续的模拟信号以外,一般还存在离散时间模拟信号、离散信号、数字信号等多种信号形式。

(3) 在连续控制系统中,控制器通常由模拟电路构成,且每个控制器只能控制一个回路;在计算机控制系统中,一台计算机可以采用分时控制的方式,同时控制多个回路,各个回路的控制规律由相应的控制算法来完成。

(4) 在连续控制系统中,如果要修改控制规律,一般需要修改原控制器的电路结构;而在计算机控制系统中,控制规律由计算机程序实现,修改控制规律,只需修改相应的程序,一般不改变其硬件电路,因此具有较好的灵活性与适应性。

(5) 计算机控制系统中的核心控制规律都是由软件来实现的,借助于计算机强大的算术与逻辑运算功能,能够较为方便地实现常规控制器难以实现的复杂控制规律,如最优控制、自适应控制、模糊控制等。

(6) 利用计算机的超强数据处理能力与互联技术,可以将整个生产过程的各部分有效地联结成一个有机的整体,以实现整个生产过程的综合自动化。

(7) 计算机控制系统一般都设有监控、报警、自诊断甚至容错与自恢复功能,因此,系统具有较好的可维护性。系统一旦出现故障,能迅速找到故障点及相应的解决方案,以便快速修复。

由于计算机控制系统是一个混合信号与混合电路系统,从理论上讲,其系统的抗干扰性能会受到较大影响,因此,计算机控制系统的抗干扰技术也是其系统设计中需要面对的一个重要课题。随着各类有效的软、硬件抗干扰技术与相关器件技术的发展,计算机控制系统的抗干扰能力得到很大提高,已能够适应大多数复杂环境中的应用。

总之,随着现代计算机与控制技术的不断进步,对控制系统的功能要求也在不断提高,与传统的连续控制系统相比,计算机控制系统的优越性也越来越明显。计算机控制已成为现代各类自动化及控制系统中的首要形式或必然选择。

1.2 计算机控制系统的组成

从系统结构而言，一个完整的计算机控制系统一般包括计算机系统、过程输入/输出通道与被控过程等三大部分。另一方面，从系统设计的角度而言，由于有计算机参与控制，因此其基本组成又涉及硬件与软件两个方面。下面将分别简要介绍计算机控制系统的硬件与软件组成。

1.2.1 计算机控制系统的硬件组成

计算机控制系统的硬件组成框图如图 1.3 所示，主要包括计算机、过程输入/输出通道、人机交互设备以及与被控过程直接相连的检测与执行装置等几个部分。

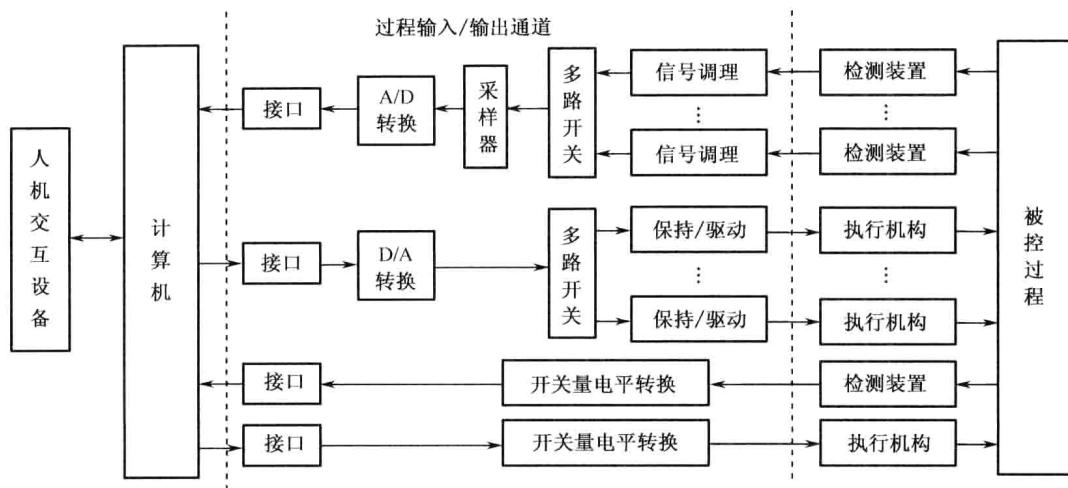


图 1.3 计算机控制系统的硬件一般组成框图

1. 计算机

计算机是计算机控制系统的核心。通过相应的接口，计算机可以向控制系统的各个部分发出各种指令，同时对被控对象的被控参数进行实时检测及处理。计算机的主要功能是通过执行相应的程序来控制整个被控系统，对相关现场信息进行实时采集与处理，按设定的控制规律进行各种数值计算与逻辑判断，并根据运算结果做出控制决策，然后输出给执行机构。根据不同被控过程的需求，计算机应该具备足够强的数据处理（算术、逻辑运算）与信息存储能力。

2. 过程输入/输出通道

过程输入/输出通道是实现计算机与被控过程之间信息传送和转换的连接通道。过程输入通道把被控过程的被控参数转换成计算机可以处理的数字信息，并通过相应的接口输入计算机。过程输出通道把计算机由接口输出的控制指令与数据转换成被控过程执行机构可以接受的信号，并送给相应的执行机构。根据信号形式的不同，过程通道一般可分为模拟量输入/输出通道与开关量（或数字量）输入/输出通道。

3. 检测与执行装置

检测与执行装置是直接与被控过程相连接的各种过程仪表，它们是被控过程的信号输入/输出单

元。检测装置一般包括传感检测单元与变送单元,即通过传感器件将被控参数的非电量转换成电信号,再经过变送单元将其变换成易于传输的统一、标准的电信号(0~5V 电压信号或 4~20mA 电流信号),以便后续处理。执行机构是直接连接于被控过程的控制或驱动部件,其功能是根据来自计算机的控制指令信号,产生相应的动作,以调节或改变被控过程的某些状态,使生产过程符合预期的要求。

4. 人机交互设备

人机交互设备提供一个供操作人员或工程师与计算机控制系统之间进行交互的平台,主要体现为一个便于操作人员完成相关工作的操作台,操作台一般设置有键盘、鼠标、操作按钮、各种显示或指示设备、打印或图形绘制设备等输入/输出设备。操作人员通过来自于各种显示设备或打印设备的相关图表、数据或视频信息,及时了解控制过程的有关情况,并可通过相应的输入设备完成控制操作,如输入或修改控制参数、设置控制规律和发送控制命令等。

1.2.2 计算机控制系统的软件组成

计算机控制系统的软件是指计算机中使用的、能够完成计算机控制系统所要求的各种功能的计算机程序总和。它是计算机控制系统的神经中枢,整个系统的动作都是在软件的指挥下进行工作的。软件系统一般由系统软件与应用软件两大部分组成。

1. 系统软件

系统软件一般是由计算机设计者或生产厂商提供的一套专门用来使用、维护和管理计算机的一类程序,并具有一定的通用性。系统软件一般包括操作系统、语言加工系统与诊断系统等。其中操作系统是整个软件系统的基础,并对整个系统性能具有较大影响。对于不同的计算机控制系统、不同的控制需求或处于不同地位的控制计算机,其操作系统可以是通用操作系统、实时操作系统或嵌入式操作系统等。

2. 应用软件

应用软件是面向用户需求而设计的程序,即根据用户要解决的实际问题而设计的各种程序。对于计算机控制系统而言,应用软件主要是指完成控制系统中各种任务的程序,一般包括控制算法程序、巡回检测与事故处理程序、数据处理与信息管理程序、人机交互程序、公共服务程序以及必要的数据库系统等。

1.3 计算机控制系统的典型应用形式

计算机控制系统有许多不同的应用形式,这与具体的被控过程特性和控制目的密切相关,对于不同的被控过程和不同的控制要求,采用不同的控制方案,从而构成了不同形式的计算机控制系统。从计算机控制系统的发展历程与实际应用角度看,主要有以下几类典型的应用形式。

1.3.1 数据采集与操作指导系统

数据采集与操作指导系统的结构如图 1.4 所示。在这种应用形式下,计算机不直接参与过程控制,即计算机的输出不直接控制被控对象。计算机主要用于对被控过程的现场状态进行实时数据采集和处理,然后进行必要的集中记录、显示、报警或打印输出,即对现场状况集中监视,并为操作人员提供操作指导信息。操作人员根据这些结果去改变调节器的给定值或直接操作执行机构,以达到控制的目的。

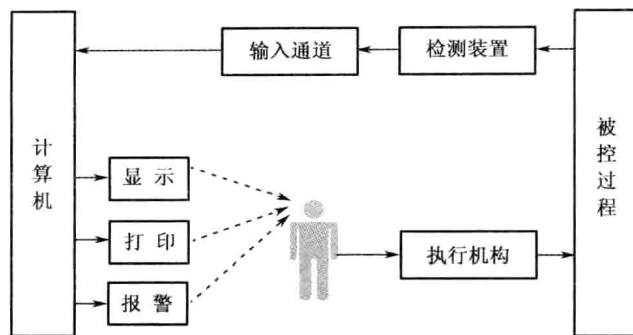


图 1.4 数据采集与操作指导系统

作为计算机在控制系统应用的初级形式，数据采集与操作指导系统具有结构简单、控制灵活、安全等优点，但由于需要人工操作，其速度受到一定限制，一般只适合于慢过程的监控。

随着计算机及数据处理与决策技术的发展，这种初级的计算机控制形式的有关概念与应用领域已得到了很大的拓展，仍然是当前计算机控制系统中一种十分重要的典型应用形式，如各种形式的需要人工干预的监控中心等，其本质上仍是数据采集与操作指导系统。

1.3.2 直接数字控制系统

直接数字控制（Direct Digital Control, DDC）系统是计算机应用于工业过程控制最普遍的一种形式，其一般结构如图 1.5 所示。计算机通过检测单元对一个或多个过程参数进行巡回检测，并经过输入通道将检测数据输入计算机，计算机按照一定的控制规律进行运算，得到相应的控制信息，并通过输出通道去控制执行机构，从而使系统的被控参数达到期望的要求。

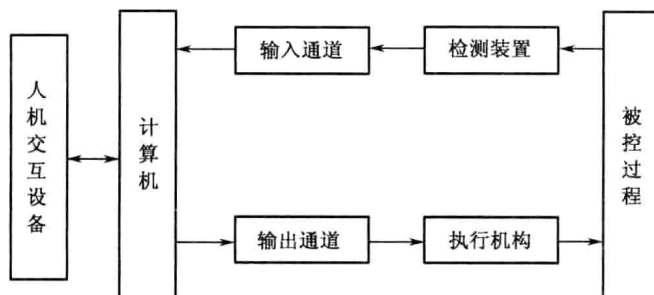


图 1.5 直接数字控制系统

DDC 系统是典型的计算机闭环控制系统，并可实现多回路控制，同时，只要通过改变算法程序还可实现较复杂的控制规律，如串级控制、前馈控制、非线性控制、最优控制、自适应控制等。

由于在 DDC 系统中计算机直接参与控制过程，因此要求计算机系统具有较好的实时性与可靠性。

1.3.3 监督计算机控制系统

对于普通的 DDC 系统，其控制参数（包括控制规律与相关参数取值）都是事先设定好的，在一次具体的控制过程中是不能被修改的，这对于一些变化比较大的复杂被控过程而言，是难以取得满意的控制效果的。在监督计算机控制（Supervisory Computer Control, SCC）系统中，通过一台专用的监督计算机，根据原始工艺信息与现场采集的其他相关参数，结合描述被控过程的数学模型，计算出生产过程的最优设定值，再将设定值输送给具体的控制单元（如模拟调节器或 DDC 系统），由控制单元

控制生产过程,从而使生产过程始终处于最优工作状态。在 SCC 中,设定值(即控制规律与相关参数)可以根据当前被控过程的状态与工艺要求,由监督计算机自动进行调整,因此,SCC 对于变化比较复杂的过程具有较好的适应能力。

根据所采用的控制单元的不同,SCC 系统有两种不同的结构形式。

1. SCC + 模拟调节器

如图 1.6 所示,在该系统结构中,监督计算机对被控过程的参数进行巡回检测,并按一定的数学模型对生产状况进行分析,计算出控制系统的最优设定值,再送入模拟调节器,由模拟调节器完成具体的控制任务。而当监督计算机发生故障时,可由模拟调节器独立完成操作。

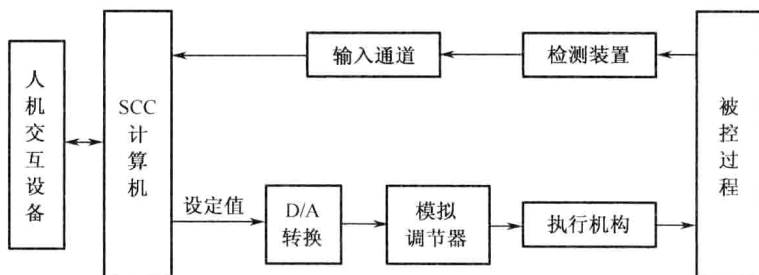


图 1.6 SCC + 模拟调节器控制系统

2. SCC + DDC

如图 1.7 所示,在此系统结构中,SCC 与 DDC 组成了一个二级控制系统,一级为监督控制级 SCC,其作用是完成被控过程现场状况的分析与最优参数的计算,并输出最优设定值给直接控制级 DDC,由 DDC 直接控制被控过程。在这种结构中,当两级计算机中任何一级发生故障时,均可由另一级暂时替代而独立完成工作,从而提高了系统的可靠性。

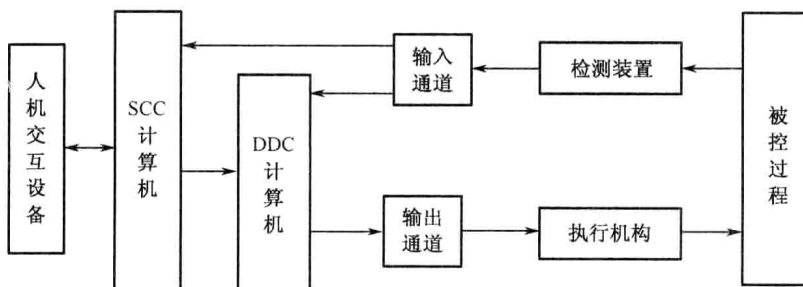


图 1.7 SCC + DDC 控制系统

1.3.4 计算机分级分布式控制系统

以上的数据采集与操作指导系统、直接数字控制与监督计算机控制均采用集中型结构,即一台计算机控制(或检测)尽可能多的控制回路,实现集中检测、集中控制、集中管理。随着计算机与控制理论不断发展,计算机控制系统的规模也在不断扩大,集中型已难以适应这类需求,于是出现了采用多台计算机构成的分级分布式控制系统。集散控制系统(Total Distributed Control System, TDCS),也称分布式控制系统(Distributed Control System, DCS),是分级分布式控制的一类典型应用形式,如图 1.8 所示。这类系统采用分级分散型控制原理、集中操作、分级管理、分

分散控制、综合协调的设计原则，将系统由下至上分为现场分布式控制级、过程控制集中监控级、生产管理级及企业经营管理级等，各级之间通过高速通信通道相互连接，传递信息，协调工作。其中，现场分布式控制级由分布于被控过程的各现场控制站构成，直接对被控过程的相关参数进行检测与控制；集中监控级主要负责生产过程的集中监视与优化控制；生产管理级主要根据上级下达的任务与本部门生产的具体情况，制定具体的生产计划、工作安排、人员与物料调配及监控级的协调等；企业经营管理级负责企业长期规划与生产计划、销售计划，将任务分解给下属部门，并对来自下级的各类数据进行分析，实行全局总调度。可见，分级分布式控制系统能较好地适应生产过程综合自动化的发展需求。

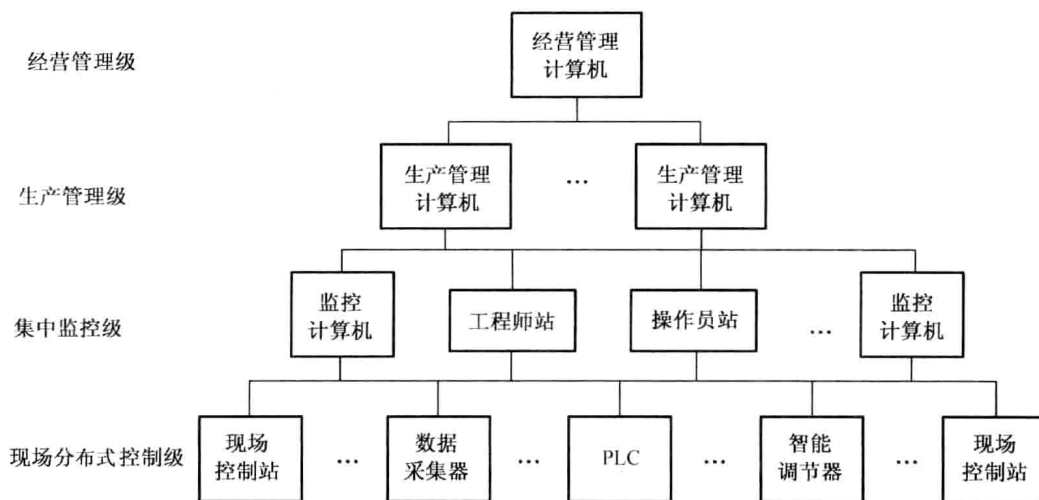


图 1.8 计算机分级分布式控制系统

1.3.5 数据采集与监督控制系统

如果说 DCS 是集中式直接数字控制面向分布式复杂控制任务的发展结果，那么数据采集与监督控制（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）系统则是由数据采集与操作指导系统面向分布距离较远、生产单位分散的数据采集与监督控制任务而产生的一类以计算机为基础的自动化监控系统。也就是说，SCADA 系统是对分布距离远、生产单位分散的生产系统进行数据采集、集中监视和分散控制的一种计算机控制系统，它可以实现远程数据采集、设备控制、测量、参数调节以及各类信号报警等各项功能，其核心是对现场信息进行远程检测与采集，并集中监视，同时进行必要的远程控制或报警处理。SCADA 系统的一般组成结构示意图如图 1.9 所示。主要包括远程终端单元（Remote Terminal Unit, RTU）、通信网络系统及中央主站系统等。中央主站系统一般由性能先进的计算机与服务器构成，一个庞大的主站系统通常包括众多工作站与多个服务器，如工程师站、生产调度站、各种监控工作站、实时数据库服务器、历史数据库服务器以及 Web 服务器等。通信网络系统是 SCADA 系统中连接远程终端与中央主站的重要桥梁，其具体构成根据具体应用背景或环境具有多种不同的形式，如有线的有音频、载波、光纤、电力载波通信等，无线的有电台、微波、卫星通信等，还有基于计算机网络的形式，如常见的互联网（Internet）与移动无线网 GPRS 网络等。RTU 一般由通信处理模块、各种数据采集模块与各种数据量（模拟量、开关量等）输出模块等构成。

与 DCS 相比，SCADA 系统主要强调对分布距离较远的现场设备与系统进行远程数据采集与集中