



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机控制系统

(第二版) (配光盘)

主 编 李元春

副主编 王德军 于在河 高 巍



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机控制系统

(第二版) (配光盘)

主 编 李元春

副主编 王德军 于在河 高 巍



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书从工程应用的角度出发,注重基础性、系统性和实用性,较深入地介绍计算机控制系统的基本知识及分析和设计方法。全书共十章,包括绪论、计算机控制系统设计的硬件基础、计算机控制系统的数学基础、计算机控制系统特性分析、计算机控制系统的间接设计方法、计算机控制系统的直接设计方法、数字控制器的状态空间设计方法、计算机控制系统的工程设计、新型计算机控制系统和计算机控制系统的可靠性设计。每一章后面都给出了大量的习题,并在书后提供了部分习题的参考答案。本书还配备了相应的多媒体教学课件,一方面方便学生理解、消化相关知识,另一方面也可供学生课下学习参阅。

本书可作为自动化专业学生的教材或参考书,也可供有关教师、科研人员及工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统 / 李元春主编. —2 版. —北京:高等教育出版社,2009.1

ISBN 978 - 7 - 04 - 025237 - 8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149420 号

策划编辑 金春英 责任编辑 李葛平 封面设计 于文燕 责任绘图 尹 莉
版式设计 范晓红 责任校对 杨凤玲 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京新华印刷厂

购书热线 010 - 58581118

免费咨询 800 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

网上订购 <http://www.landaco.com>

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

畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 19.75

字 数 480 000

版 次 2005 年 3 月第 1 版

2009 年 1 月第 2 版

印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价 29.80 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25237 - 00

前 言

目前,计算机控制技术在人们的日常生活、工农业生产和国防建设等领域得到了广泛应用。大到非常复杂的控制系统,小到各种微型控制设备,计算机控制技术在其中均起着越来越重要的作用。随着计算机技术的迅速发展和微型计算机的日益普及,尤其是各种性能优良、价格低廉的嵌入式控制器的发展,使得用计算机实现的控制器的成本不断降低,其性能却不断提高,从而推动了计算机在控制系统中的应用。同时,通过软件编程可实现各种复杂、灵活的控制算法,因而计算机控制技术得以广泛应用于工农业生产、交通运输以及国防建设等各个领域,并取得了良好的控制效果。

本书是以微型计算机为控制工具,较深入地介绍计算机控制系统的基本知识和基本应用技术。全书共分十章。第一章介绍计算机控制系统的一些基本概念;计算机控制系统的组成、特点;计算机控制系统的分类;计算机控制理论及计算机控制系统的发展。第二章介绍计算机控制系统的过程通道与接口、电源、信号的采样与重构以及数字滤波等基本知识。第三章介绍计算机控制系统的数学基础,包括差分方程、 z 变换理论、脉冲传递函数。第四章介绍计算机控制系统的分析,包括稳定性分析、动态特性分析及稳态误差分析。第五章介绍数字控制器的模拟化设计方法,包括模拟控制器与数字控制器的转换以及数字PID控制器的设计方法。第六章介绍数字控制器直接设计法的原理、方法;介绍最少拍无差有波纹、无波纹系统的设计方法;史密斯预估器设计方法;大林设计方法;数字控制器的根轨迹设计法和频域设计法。第七章介绍基于状态空间模型的数字控制器设计方法。第八章介绍计算机控制系统的设计方法和步骤,以及计算机控制系统的设计举例。第九章介绍新型计算机控制系统,包括当今应用非常广泛的嵌入式系统的基本概念、应用领域、设计实例和发展状况;集散控制系统、现场总线控制系统及网络控制系统的基本概念、结构、特点及其应用问题。第十章介绍计算机控制系统的可靠性技术,包括干扰的来源及其抗干扰措施、冗余技术及故障诊断技术。

本书立足于基础性、实用性和先进性,从系统的概念出发讲述各部分内容,尽量用易于理解的方式和语言阐述问题。为方便学生理解、消化书中的基本知识和基本概念,本书提供了大量的MATLAB仿真示例。每一章后面都给出了大量的习题,并在书后提供了部分习题的参考答案。本书还配备了相应的多媒体教材,一方面方便学生理解、消化相关知识,另一方面也可供学生课下学习参阅。

学习本书一般需要具备以下背景知识:连续控制系统理论的基本知识;微机原理和微机接口技术的基本知识等。

前 言

全书由吉林大学李元春教授主编并统稿,王德军、于在河、高巍参编。书中第一、六、七、九章由李元春、王德军编写;第二、八、十章由李元春、于在河编写;第三、四、五章由李元春、高巍编写。

本书由哈尔滨工业大学马广富教授审阅,马教授对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2008年5月

目 录

第一章 绪 论	1	5.2 基本设计方法	102
1.1 计算机控制系统概述	1	5.3 数字 PID 控制器的设计	109
1.2 计算机控制系统的类型	4	5.4 数字 PID 控制器算法的改进	114
1.3 计算机控制理论	7	5.5 数字 PID 控制器的参数整定	121
1.4 计算机控制系统应用实例	8	习题	125
1.5 计算机控制系统的发展	12	第六章 计算机控制系统的直接设计	
第二章 计算机控制系统设计的硬件		方法	128
基础	16	6.1 概述	128
2.1 开关量输入	16	6.2 最少拍控制系统设计	129
2.2 开关量输出	21	6.3 纯滞后对象的控制算法	141
2.3 模拟量输入	24	6.4 设计数字控制器的根轨迹法	148
2.4 模拟量输出	36	6.5 数字控制器的频域设计法	154
2.5 计算机控制系统中的电源	38	习题	161
2.6 信号采样与重构	47	第七章 数字控制器的状态空间设计	
2.7 数字滤波	58	方法	165
习题	59	7.1 线性系统的状态空间描述及线性	
第三章 计算机控制系统的数学基础	61	离散系统状态空间	165
3.1 差分方程	61	7.2 线性定常离散系统的能控性和	
3.2 z 变换	65	能观性	170
3.3 逆 z 变换	68	7.3 状态反馈设计法	177
3.4 脉冲传递函数	71	7.4 输出反馈设计法	182
习题	76	7.5 状态观测器设计	183
第四章 计算机控制系统特性分析	79	7.6 应用状态观测器的状态反馈	
4.1 计算机控制系统的稳定性	79	系统	187
4.2 计算机控制系统的动态特性	87	7.7 二次型最优控制算法设计	189
4.3 计算机控制系统的稳态误差	91	习题	193
4.4 离散系统根轨迹和频率特性	93	第八章 计算机控制系统的工程设计	197
习题	98	8.1 计算机控制系统的设计步骤	197
第五章 计算机控制系统的间接设计		8.2 数字伺服系统	204
方法	102	8.3 双闭环直流数字调速系统	207
5.1 概 述	102	8.4 电阻炉温度控制系统	214

目 录

8.5 数字程序控制系统	221	10.1 概 述	280
习题	232	10.2 干扰的来源	281
第九章 新型计算机控制系统	233	10.3 电源与供电系统的抗干扰 措施	282
9.1 嵌入式系统	233	10.4 信号传输通道的抗干扰措施	286
9.2 集散控制系统	245	10.5 系统可靠性设计	289
9.3 现场总线控制系统	254	10.6 故障诊断技术	295
9.4 网络控制系统	266	习 题	299
习题	279	部分习题参考答案	301
第十章 计算机控制系统的可靠性 设计	280	参考资料	306

绪 论

电子计算机的出现,在科学技术上引起了一场深刻的革命。特别是 20 世纪 70 年代以来,随着大规模集成电路的发展,出现了微型计算机及单片微型计算机,以其运行速度和工作可靠性的提高、成本的不断降低,被广泛应用于工业、农业、国防以及日常生活的各个领域。电子计算机不仅在数据处理、科学计算等方面应用广泛,而且在工业自动控制方面也得到了越来越广泛的应用。本章将介绍计算机控制系统的一些基本概念,为后续章节的学习奠定必要的基础。

1.1 计算机控制系统概述

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技术和计算机技术飞速发展的基础上产生的。20 世纪 50 年代中期,经典的控制理论已经发展成熟,并在不少工程技术领域中得到了成功的应用。但是,经典的控制理论也有明显的局限性,在对复杂系统的设计和复杂控制规律的实现上很难满足更高的要求。现代控制理论的发展为自动控制系统的分析、设计与综合增添了理论基础,而计算机技术的发展为新型控制方法的实现提供了非常有效的手段,两者的结合极大地推动了自动控制技术的发展。连续控制系统的典型结构如图 1.1 所示,系统中各处的信号均为连续信号。

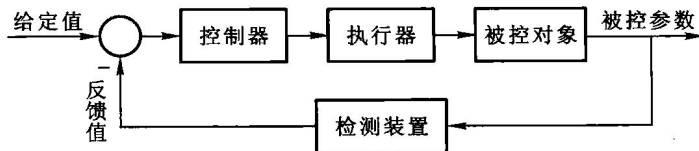


图 1.1 连续控制系统的典型结构

图 1.1 中,给定值与反馈值经过比较器比较产生偏差,控制器对偏差进行调节计算,产生控制信号驱动执行机构,从而使被控参数的值达到期望值。将连续控制系统中的比较器和控制器的功能用计算机来实现,就组成了一个典型的计算机控制系统,其基本框图如图 1.2 所示。如果计算机是微型计算机,就组成微型计算机控制系统。在计算机控制系统中,计算机的输入和输出信号都是数字信号,而被控对象的被控参数一般都是模拟量,执行器的输入信号也大多是模拟

量,因此,需要有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。

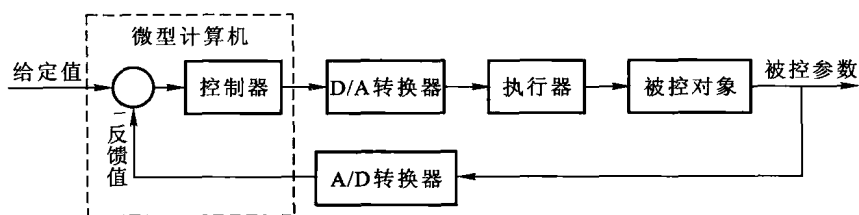


图 1.2 计算机控制系统基本框图

在计算机控制系统中,除了包含有数字信号外,由于被控对象是连续的,因此其中也包含有连续的信号。所谓数字信号是指在时间上离散、幅值上量化的信号。因此,计算机控制系统也称为数字控制系统。如果忽略幅值上的量化效应,数字信号即为离散信号,此时,计算机控制系统又称为采样控制系统。如果将连续的被控对象连同保持器一起进行离散化,那么采样控制系统即简化为离散控制系统。

计算机控制系统的控制过程通常可以归结为以下两步:

- ① 数据采集及处理,即对被控对象的被控参数进行实时检测,并输给计算机进行处理。
- ② 实时控制,即按已设计的控制规律计算出控制量,实时向执行器发出控制信号。

上述过程的实时概念,是指信号的输入、计算和输出都要在一定时间(采样间隔)内完成。上述过程的不断重复,使整个系统能够按照一定的品质指标工作,并且对被控参数和设备本身所出现的异常状态及时进行监测并作出迅速处理。

2. 计算机控制系统的组成

计算机控制系统由计算机系统和被控对象组成,如图 1.3 所示。计算机系统又由硬件和软件组成。

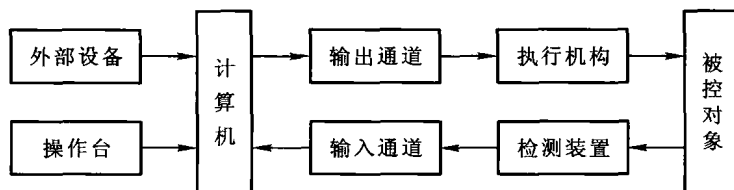


图 1.3 计算机控制系统的组成

(1) 硬件

硬件包括计算机、过程输入输出通道、外部设备和操作台等。

① 计算机

计算机是计算机控制系统的核心,通过接口可以向系统的各个部分发出各种命令,同时对被控对象的被控参数进行实时检测及处理。其具体功能是完成程序存储、程序执行、数值计算、逻

辑判断、数据处理等工作。

② 过程输入输出通道

过程输入输出通道是在计算机和被控对象(或生产过程)之间设置的信息传送和转换的连接通道。过程输入通道把被控对象(或生产过程)的被控参数转换成计算机可以接受的数字代码。过程输出通道把计算机输出的控制命令和数据,转换成可以对被控对象(或生产过程)进行控制的信号。过程输入输出通道一般分为:模拟量输入通道、模拟量输出通道、开关量输入通道、开关量输出通道。

③ 外部设备

实现计算机和外界交换信息的设备称为外部设备(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。输入设备有键盘、光电输入机等。它主要用来输入程序和数据。输出设备有打印机、记录仪、纸带穿孔机、显示器(数码显示器或 CRT 显示器)等。它主要用来向操作人员提供各种信息和数据,以便及时了解控制过程。外存储器(简称外存)有磁带装置、磁盘装置,它们兼有输入输出功能,主要用来存储系统程序和数据。

④ 操作台

操作台是操作人员与计算机控制系统进行“对话”的装置,主要包括如下几部分:

- a. 显示装置,如显示屏幕、LED 或 LCD 数码显示器,用来显示操作人员要求显示的内容或报警信号。
- b. 一组或几组功能键,通过功能键,可向主机申请中断服务,其中包括复位键、启动键、打印键、显示键等。
- c. 一组或几组数字键,用来送入某些数据或修改控制系统的某些参数。

(2) 软件

软件是指能够完成各种功能的计算机控制系统的程序系统。它是计算机系统的神经中枢,整个系统的动作,都是在软件的指挥下协调工作的。它由系统软件和应用软件组成。

系统软件是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。系统软件通常包括操作系统、语言加工系统和诊断系统,其具有一定的通用性,一般随硬件一起由计算机生产厂家提供。应用软件是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内各种任务的程序,如控制程序、数据采集及处理程序、巡回检测及报警程序等。

3. 计算机控制系统的特点

计算机控制系统与连续控制系统相比,具有以下特点:

① 在连续控制系统中,各处的信号是连续模拟信号。而在计算机控制系统中,除仍有连续模拟信号外,还有离散信号、数字信号等多种信号。因此,计算机控制系统是模拟和数字的混合系统。

② 在连续控制系统中,控制规律是由模拟电路实现的,控制规律越复杂,所需要的模拟电路往往越多。如果要修改控制规律,一般必须改变原有的电路结构。而在计算机控制系统中,控制规律是由计算机通过程序实现的(数字控制器),修改一个控制规律,只需修改程序,一般不对硬件电路进行改动,因此具有很大的灵活性和适应性。

③ 计算机具有丰富的指令系统和很强的逻辑判断功能,能够实现模拟电路不能实现的复杂控制规律。

④ 在连续控制系统中,给定值与反馈值的比较是连续进行的,控制器对产生的偏差也是连续调节的。而在计算机控制系统中,计算机每隔一定时间间隔,向 A/D 转换器发出启动转换信号,并对连续信号进行采样,经过计算机处理后,产生控制信号通过 D/A 转换输出,将离散时间信号转换成时间连续信号,作用于被控对象。因此,计算机控制系统并不是连续控制的,而是离散控制的。

⑤ 在连续控制系统中,一般是一个控制器控制一个回路。而在计算机控制系统中,由于计算机具有高速的运算处理能力,一个数字控制器经常可以采用分时控制的方式,同时控制多个回路。

⑥ 采用计算机控制,如分级计算机控制、集散控制系统、计算机网络等,便于实现控制与管理一体化,使工业企业的自动化程度进一步提高。

1.2 计算机控制系统的类型

根据计算机在控制系统中的控制功能和控制目的,可将计算机控制系统分为以下几种类型。

1. 操作指导控制系统

操作指导控制系统的结构如图 1.4 所示。所谓操作指导,是指计算机的输出不直接用来控制被控对象,只是每隔一定时间,计算机进行一次数据采集,将系统的一些参数经 A/D 转换后送入计算机进行计算及处理,然后进行报警、打印和显示。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。操作指导控制系统是一种开环控制结构。该系统的优点是结构简单,控制灵活和安全。缺点是要人工操作,速度受到限制,故不适合用于快速过程的控制和多个对象的控制。它主要用于计算机控制系统研制的初级阶段,或用于试验新的数学模型和调试新的程序。

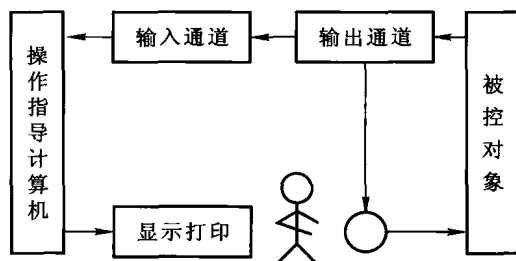


图 1.4 操作指导控制系统

2. 直接数字控制系统

直接数字控制 DDC(Direct Digital Control)系统是计算机用于工业过程控制最普遍的一种方

式,其结构如图 1.5 所示。计算机通过检测元件对一个或多个系统参数进行巡回检测,并经过输入通道送入计算机。计算机根据规定的控制规律进行运算,然后发出控制信号直接去控制执行机构,使系统的被控参数达到预定的要求。

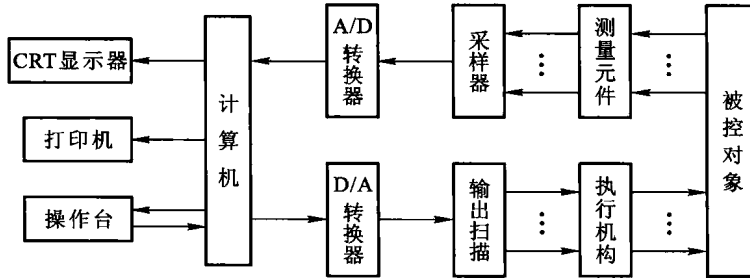


图 1.5 直接数字控制系统

在 DDC 系统中的计算机参与闭环控制过程,它不仅能取代模拟调节器,实现多回路的 PID (比例、积分、微分)调节,而且,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。

3. 监督计算机控制系统

监督计算机控制 SCC(Supervisory Computer Control)系统结构如图 1.6 所示。在 DDC 系统中,是用计算机代替模拟调节器进行控制的。而在 SCC 系统中,则是由计算机按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者 DDC 计算机,最后由模拟调节器或者 DDC 计算机控制生产过程,从而使生产过程始终处于最佳工作。

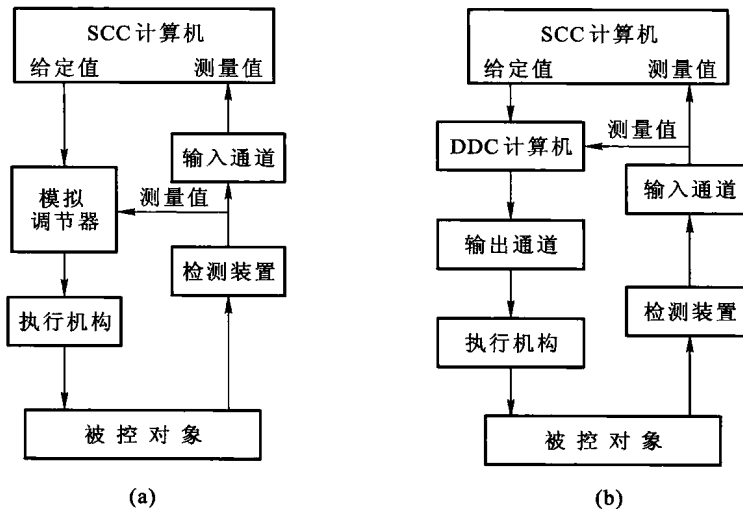


图 1.6 监督计算机控制系统

监督计算机控制系统有两种不同的结构形式。一种是 SCC + 模拟调节器系统;另一种是 SCC + DDC 系统。

(1) SCC + 模拟调节器的控制系统

该系统原理图如图 1.6(a) 所示。在此系统中,计算机对系统的被控参数进行巡回检测,并按一定的数学模型对生产工况进行分析,计算出被控对象各参数的最优给定值送给模拟调节器。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后输出给执行机构,以达到调节被控参数的目的。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 1.6(b) 所示。在此系统中,SCC 与 DDC 组成了二级控制系统,一级为监督控制级 SCC,其作用与 SCC + 模拟调节器系统中的 SCC 一样,完成车间或工段等高一级的最优化分析和计算,给出最佳给定值,送给 DDC 级计算机直接控制生产过程。SCC 级计算机与 DDC 级计算机之间通过接口进行信息传送,当 DDC 级计算机出现故障时,可由 SCC 级计算机代替,因此,大大提高了系统的可靠性。

4. 分级计算机控制系统

生产过程中既存在控制问题,也存在大量的管理问题。同时,设备一般分布在不同的区域,其中各工序、各设备同时并行地工作,基本相互独立,故整个系统比较复杂。过去,由于计算机价格高,复杂的生产过程控制系统往往采取集中控制方式,以便对计算机充分利用。这种控制方式任务过于集中,一旦计算机出现故障,将会影响全局。价格低廉而功能完善的微型计算机的出现,可以做到由若干台微型计算机或微处理器分别承担部分任务,这种分级(或分布式)计算机控制系统有代替集中控制系统的趋势。该系统的特点是将控制任务分散,用多台计算机分别执行不同的任务,既能进行控制又能实现管理。图 1.7 所示的分级计算机控制系统是一个四级系统,各级计算机的任务如下:

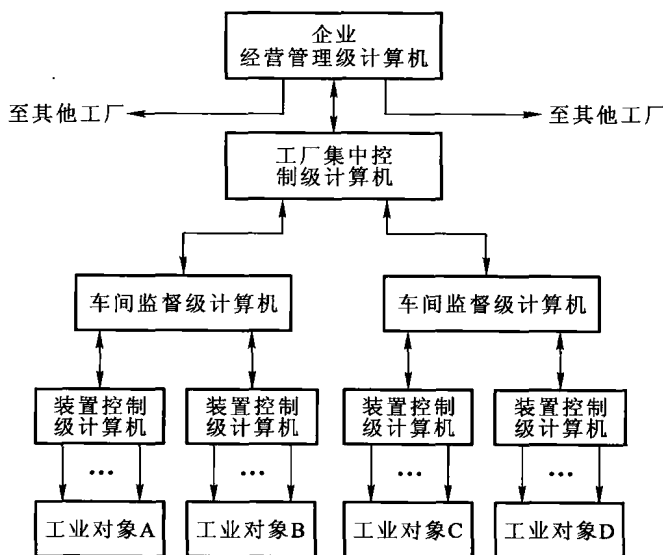


图 1.7 分级计算机控制系统

装置控制级(DDC级),对生产过程或单机直接进行控制,如进行PID控制或前馈控制等,使所控制的生产过程在最优的工况下工作。

车间监督级(SCC级),根据厂级下达的命令和通过装置控制级获得的生产过程的数据,进行最优化控制。它还担负着车间内各个工段的协调控制及担负着对DDC级的监督。

工厂集中控制级,根据上级下达的任务和本厂情况,制定生产计划,安排本厂工作,进行人员调配及各车间的协调,并及时将SCC级和DDC级的情况向上级反映。

企业经营管理层,制定长期发展规划、生产计划、销售计划,发命令至各工厂,并接受各工厂、各部门发回来的信息,实行全企业的总调度。

1.3 计算机控制理论

计算机控制系统与通常的连续控制系统的差别在于,控制规律是由计算机通过软件来实现的。由于计算机具有很强的计算、逻辑判断及存储信息的能力,因此它可实现过去连续控制系统难以实现的更为复杂的控制规律,如非线性控制、模糊控制、自适应控制和自学习控制等。计算机控制系统中除了包含连续信号外,还包含有数字信号。由于数字信号所固有的时间上离散、幅值上量化的效应,从而使得计算机控制系统与连续控制系统在本质上有许多不同的性质。当采样周期比较小(时间上的离散效应可忽略)以及计算机转换及运算字长比较长(幅值上的量化效应可忽略)时,可以采用连续控制系统的分析和设计方法来研究计算机控制系统的问题。然而当采样周期比较大(选取较大的采样周期可降低对计算机的要求)以及幅值上的量化效应不可忽略时,必须有专门的理论来分析和设计计算机控制系统。早期人们习惯于用连续系统理论来设计计算机控制系统。当采样周期较大时,实际系统的性能往往比设计时所预期的要差。然而,当采用直接离散化的设计方法时,计算机控制系统甚至可以比相应的连续系统达到更好的性能。例如,对于一个具有双重积分的控制对象,如图1.8(a)所示,若采用连续的控制方法,其典型的阶跃动态响应如图1.8(b)所示。而采用计算机控制,并用直接离散化的设计方法,可以获得如图1.8(c)所示的动态响应。

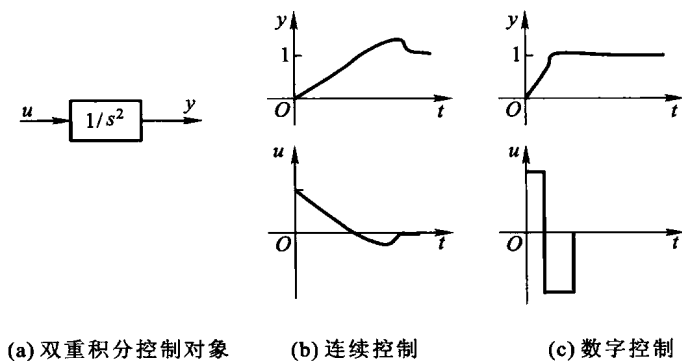


图 1.8 双积分控制对象的阶跃响应

由图可见,在最大控制量相同的情况下,采用数字控制可以获得更满意的动态响应,输出量

经过两拍的时间即完全达到稳态,且系统无超调。

再如,对于简单的一阶惯性被控对象,只采用比例控制,若采用连续的控制方法,无论比例增益多大系统总是稳定的。但是,若采用计算机控制,则可能在某个比例增益下,系统产生幅度不大的自持振荡。这是应用连续系统的理论甚至离散系统的理论所不能解释的,是由于数字信号幅值上量化效应所引起的特殊问题。

可见,对于计算机控制系统的分析和设计,不只是简单地推广连续系统的理论,同时也需要一些专门理论来对它进行研究。计算机控制系统理论主要包括离散系统理论、采样系统理论及数字系统理论。

离散系统理论主要指对离散系统进行分析 and 设计的各种方法的研究。它主要包括:

① 差分方程及 z 变换理论。利用差分方程、 z 变换及传递函数等数学工具来分析离散系统的性能和稳定性。

② 常规设计方法。以传递函数作为数学模型对离散系统进行常规设计的各种方法的研究。如最小拍控制、根轨迹法设计、离散 PID 控制及直接解析设计法等。

③ 极点配置设计法。其中包括基于传递函数模型及基于状态空间模型的两种极点配置设计方法。在利用状态空间模型时,它包括按极点配置设计控制规律及设计观测器两方面的内容。

④ 最优设计方法。主要包括线性二次型最优控制及状态的最优估计两方面内容,简称 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 问题。

⑤ 系统辨识及自适应控制。

采样系统理论除了包括离散系统的理论外,还包括以下一些内容:

① 采样理论。主要包括香农 (Shannon) 采样定理、采样频谱及混叠、采样信号的恢复以及采样系统的结构图分析等。

② 连续模型及性能指标的离散化。为了使采样系统能变成纯粹的离散系统来进行分析和设计,需将采样系统中的连续部分进行离散化,这里首先需要将连续环节的模型离散化,由于模型表示主要采用传递函数和状态方程两种形式,因此,连续模型的离散化也主要包括这两个方面。由于实际的控制对象是连续的,性能指标函数也常常以连续的方式给出,因此也需要将连续的性能指标进行离散化。

③ 采样控制系统的仿真。

④ 采样周期的选择。

⑤ 数字信号整量化效应的研究,如量化误差、非线性特性的影响等。同时还包括数字控制器实现中的一些问题,如计算延迟、控制算法编程等。

1.4 计算机控制系统应用实例

本节介绍一些典型的计算机控制系统应用实例,并给出常用被控对象的数学模型。

1. 卫星模型

卫星模型常应用于卫星姿态控制系统中。卫星常要求进行姿态控制,以使它的天线和传感器相对于地球具有适当的方位。为此,需要利用推进器对三个轴进行姿态控制,分别控制卫星的

偏离角、倾斜角和转动角。卫星的结构如图 1.9 所示。

设 $\theta(t)$ 为卫星偏离角,由推进器对其进行控制。推进器同时还对卫星的倾斜角及转动角进行控制,此处仅考虑其对卫星偏离角的控制。

控制卫星的偏离角时,由推进器提供力矩 $\tau(t)$ 。图示中两个推进器产生的力矩用于减小 $\theta(t)$,另外两个推进器则用于增加 $\theta(t)$ 。

由于卫星所处环境基本上不存在摩擦力,并设卫星是刚性的,则有

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \tau(t) \quad (1.1)$$

其中 J 为卫星的转动惯量。对式(1.1)进行拉普拉斯变换,得系统传递函数为

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js^2} \quad (1.2)$$

即卫星模型可用如式(1.1)所示的二阶微分方程或如式(1.2)所示的二阶传递函数来描述,此外还可用状态空间模型来描述。定义如下状态变量

$$x_1(t) = \theta(t) \quad (1.3)$$

$$x_2(t) = \dot{\theta}(t) = \dot{x}_1(t) \quad (1.4)$$

则有状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} \tau(t) \quad (1.5)$$

综上,卫星模型可由式(1.1)、式(1.2)或式(1.5)描述。

2. 直流伺服电机模型

直流伺服系统广泛地应用于工业生产、航空航天、机器人等控制领域。直流伺服电机为此类系统的核心部件,其结构和工作原理与普通小型直流电动机相同。直流伺服电机最常用的控制方式是电枢控制,即励磁绕组加恒定励磁电压,电枢绕组加控制电压,当负载转矩恒定时,电枢的控制电压升高,电动机的转速就升高;反之,减小电枢控制电压,电动机的转速就降低;改变控制电压的极性,电动机就反转;控制电压为零,电动机就停转,故可实现对被控对象的机械运动的快速控制。直流伺服电机的结构如图 1.10 所示。

图中,电机电枢的电阻及电感分别为 R_a 及 L_a ,对大部分直流伺服电机而言,其电枢电感可忽略不计。直流伺服电机的反电势可如下表示

$$e_m(t) = C_e \omega(t) = C_e \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.6)$$

其中, $\theta(t)$ 为电机转动角, $\omega(t)$ 为电机转动角速度, C_e 为反电势系数,由电机结构决定。设电机轴总转动惯量为 J ,总粘性摩擦系数为 f ,令 $\tau(t)$ 为电机产生的总力矩,有

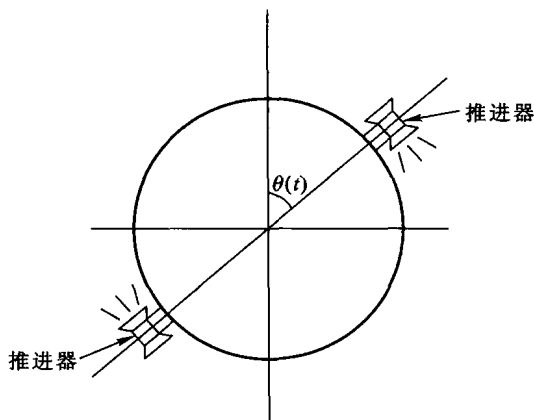


图 1.9 卫星结构图

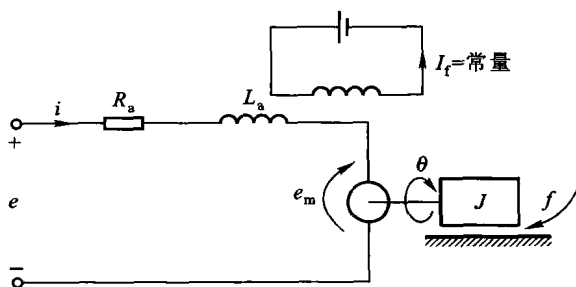


图 1.10 直流伺服电机结构图

$$\tau(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.7)$$

电动机所产生的力矩还可表示为

$$\tau(t) = K_T i(t) \quad (1.8)$$

其中, $i(t)$ 为电枢电流, K_T 为电机转矩系数。由此可得电枢电压方程

$$e(t) = i(t)R_a + e_m(t) \quad (1.9)$$

由以上 4 个方程可得输出 $\theta(t)$ 与输入 $e(t)$ 的关系。由方程式(1.9)和式(1.6)有

$$i(t) = \frac{e(t) - e_m(t)}{R_a} = \frac{e(t)}{R_a} - \frac{C_e}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.10)$$

则由式(1.7), 式(1.8)和式(1.10)有

$$\tau(t) = K_T i(t) = \frac{K_T}{R_a} e(t) - \frac{K_T C_e}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + f \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.11)$$

此方程可写为

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{fR_a + K_T C_e}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{K_T}{R_a} e(t) \quad (1.12)$$

此二阶模型即所求电机模型, 若电机的电枢电感不忽略, 则此模型为三阶模型, 有兴趣的读者可以自己推导。

对式(1.12)进行拉普拉斯变换得到系统传递函数

$$\frac{\Theta(s)}{E(s)} = G(s) = \frac{\frac{K_T}{R_a}}{Js^2 + \frac{fR_a + K_T C_e}{R_a}s} = \frac{\frac{K_T}{R_a}}{s \left(\frac{fR_a + K_T C_e}{R_a} s + 1 \right)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (1.13)$$

式中, $K_m = \frac{K_T}{fR_a + K_T C_e}$ 为电机传递系数, $T_m = \frac{JR_a}{fR_a + K_T C_e}$ 为机电时间常数。

定义如下状态变量

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \theta(t) \\ x_2(t) &= \dot{\theta}(t) = \dot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (1.14)$$

则得系统状态方程为