

JISUANJI KONGZHI
JI FANGZHEN

计算机控制及仿真



朱苏朋 符文星 杨军 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

计算机控制及仿真

朱苏朋 符文星 杨 军 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了计算机控制系统的组成、工作原理和设计方法。本书是作者在多年教学工作的基础上,广泛参考国内外相关资料编写而成的。编写过程中力图做到理论与实践相结合、内容精练、难易适中。

全书共6章,包括计算机控制概述、计算机控制系统中信号的转换和处理、数字程序控制技术、经典计算机控制系统设计方法、PID控制在飞行器姿态控制中的应用、离散域中的计算机控制方法。本书包含全部示例的 Matlab 计算程序源代码,以方便读者学习使用。

本书可供控制及相关专业高等院校教师和学生以及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制及仿真 / 朱苏朋, 符文星, 杨军编著. —北京: 国防工业出版社, 2009.8
ISBN 978-7-118-06453-7

I. 计... II. ①朱...②符...③杨... III. ①计算机控制
②计算机仿真 IV. TP273 TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 115793 号

国防工业出版社出版发行

(北京海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

露马印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 13 1/4 字数 318 千字

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

计算机控制理论是现代自动控制理论的重要组成部分,是经典自动控制理论与现代计算机技术相结合的产物。近年来,计算机控制理论被广泛地应用于国防与国民经济发展的各个领域,以航空、航天系统为例,目前在研的新型导弹、飞机及航天器上均广泛采用计算机控制系统来提高其性能。可以毫不夸张地说,计算机控制系统已经成为自动控制系统发展的必然方向。

本书是以多年教学工作为基础,同时广泛参考国内外相关文献资料编撰而成的,其目的是为高等院校的学生及相关科研人员提供一本入门的教材或参考资料。内容涵盖计算机控制系统的组成、工作原理和实际方法,力图使读者通过本书的学习,可以对计算机控制系统有一个全面的认识。本书中所有的算例均给出 Matlab 计算源代码,方便读者进行深入学习。

本书共 6 章。第 1 章介绍了计算机控制系统;第 2 章介绍了计算机控制系统中采样信号的转换和处理;第 3 章介绍了数字程序控制技术;第 4 章介绍了计算机控制系统的经典设计方法及仿真;第 5 章介绍了 PID 控制在飞行器姿态控制中的应用;第 6 章介绍了离散域中的计算机控制方法及仿真。

本书由朱苏朋、符文星和杨军共同编写,朱苏朋负责统稿。同时本书在编写过程中得到了西北工业大学航天学院精确制导控制及测试技术课题组全体研究生的大力支持,在此表示衷心感谢。

本书涉及内容较多,其中难免有错误之处,欢迎批评指正。

目 录

第1章 计算机控制概述	1
1.1 计算机控制系统的概念	1
1.1.1 计算机控制基础	1
1.1.2 计算机控制系统的基本特点	2
1.1.3 计算机控制的控制过程	3
1.2 计算机控制系统的工作方式和组成	4
1.2.1 计算机控制系统的工作方式	4
1.2.2 计算机控制系统的组成	4
1.2.3 导弹计算机控制系统举例	5
1.2.4 计算机控制系统的控制计算机特点	6
1.3 计算机控制系统的分类	7
1.3.1 按功能分类	7
1.3.2 按控制规律分类	10
1.4 计算机控制系统的研究内容和基本要求	10
1.4.1 计算机控制系统的研究内容	10
1.4.2 计算机控制系统的基本要求	11
1.5 计算机控制系统的优越性	12
习题	12
第2章 计算机控制系统的信号	14
2.1 信号的转换和处理	16
2.1.1 采样过程及其数学描述	16
2.1.2 前置滤波	22
2.1.3 采样信号的复现	23
2.1.4 后置滤波	27
2.1.5 信号的数字化过程	28
2.2 过程通道的组成和功能	30
2.2.1 模拟量输入通道	30
2.2.2 模拟量输出通道	32
2.2.3 数字量输入通道	32
2.2.4 数字量输出通道	33
习题	33
第3章 数字程序控制技术	34

3.1 数字程序控制基础	34
3.1.1 闭环数字程序控制	34
3.1.2 开环数字程序控制	34
3.2 开环数值控制的基本原理	35
3.2.1 数值控制的基本原理	35
3.2.2 逐点比较法插补原理	36
3.2.3 用 Matlab 实现直线插补计算程序	40
3.3 步进电机的控制	47
3.3.1 步进电机的工作原理	47
3.3.2 步进电机的工作方式	48
3.3.3 步进电机控制系统原理	50
习题	50
第4章 计算机控制系统的经典设计及仿真	51
4.1 连续域—离散化设计	51
4.1.1 模拟化设计方法	51
4.1.2 离散化方法	53
4.1.3 连续域—离散化设计及仿真举例	62
4.2 数字 PID 控制器设计及仿真	65
4.2.1 模拟 PID 控制器及仿真	65
4.2.2 数字 PID 控制算法及仿真	73
4.3 对标准 PID 算法的改进	83
4.3.1 位置式 PID 算法的积分饱和作用及其抑制	83
4.3.2 抑制干扰的 PID 算法	96
4.3.3 带死区的 PID 控制算法	113
4.4 PID 控制器参数选择	117
4.4.1 采样周期的选择	117
4.4.2 参数整定方法	118
习题	130
第5章 PID 控制在飞行器姿态控制中的应用	132
5.1 导弹纵向通道姿态角控制系统组成原理	132
5.2 导弹弹体小扰动线性化模型	132
5.3 导弹飞行控制系统数学模型	133
5.4 导弹纵向通道阻尼回路设计	134
5.5 导弹纵向通道姿态角控制系统设计仿真举例	134
习题	137
第6章 计算机控制系统的离散化设计方法及仿真	138
6.1 z 平面根轨迹设计	139
6.1.1 s 平面和 z 平面之间的映射关系	139
6.1.2 系统动态指标和 z 域零极点的关系	145

6.1.3	z 平面根轨迹的绘制法	149
6.1.4	计算机控制系统的根轨迹设计方法及仿真	151
6.2	频率域设计方法	158
6.2.1	w 变换和 w' 变换	158
6.2.2	w' 变换的特性	158
6.2.3	计算机控制系统的频率域设计方法及仿真	162
6.3	解析设计法	168
6.3.1	解析设计法的概念及步骤	168
6.3.2	最少拍系统设计原则	169
6.3.3	最少拍有波纹系统设计	170
6.3.4	最少拍无波纹系统设计	188
6.3.5	最少拍系统的改进设计——惯性因子法	193
6.3.6	复杂控制规律——纯滞后对象的控制	195
	习题	210
	附录 常见系统的 Z 变换和广义 Z 变换	212
	参考文献	213

第 1 章 计算机控制概述

自动控制对于工业、农业生产的发展有着重要的作用,而且在飞行器飞行控制如导弹制导、导弹控制飞行等领域中也有广泛的应用。

随着计算机的出现和发展,数字计算机不仅在科学计算、数据处理等方面获得了广泛的应用,而且在自动控制领域中也得到了越来越广泛的应用。数字计算机在自动控制中的基本应用就是直接参与控制,承担了控制系统中控制器的任务,从而形成了计算机控制系统。它的参与使自动控制系统的结构、分布和设计发生了较多的变化,由于计算机控制的优越性及其良好的发展前景,迫切需要我们掌握计算机控制技术,掌握分析、设计和构成计算机控制的理论和方法。

本书以计算机控制理论为基础,概述计算机控制系统的分析方法,总结计算机控制系统的设计方法和控制规律,同时,联系实际讨论计算机控制系统的实现方法。

本课程的特点是:

- (1) 以自动控制理论、计算机文化、A/D、D/A 等课程为基础。
- (2) 技术性、综合性和实践性强。

1.1 计算机控制系统的概念

1.1.1 计算机控制基础

计算机控制系统是建立在计算机控制理论基础上的,一种以计算机为手段的控制系统。简单地讲,含有计算机并且由计算机完成部分或全部控制功能的控制系统,称作计算机控制系统。

控制系统的一般形式如图 1.1 所示,而这种控制系统实际上就是模拟控制系统。

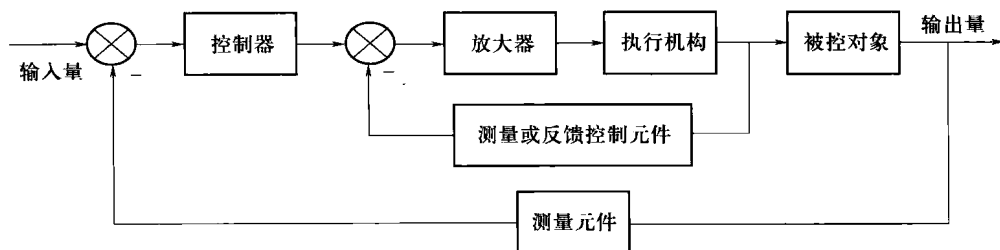


图 1.1 自动控制系统的基本结构图

从图 1.1 中可以看出,自动控制系统的基本功能是信号的传递、加工和比较。一般来说,一个闭环控制系统由以下基本元件或装置组成。

- (1) 测量元件:对系统输出量进行测量。

(2) 比较元件:对系统的输入量和输出量进行比较,给出偏差信号,起信号综合作用。

(3) 放大元件:对微弱偏差信号进行放大,使之可输出足够的功率。

(4) 执行机构:根据放大后的偏差信号,对被控对象执行控制任务,使被控制的输出量与给定量相一致。

(5) 被控对象:自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。

(6) 控制器:或称校正装置,是将偏差信号进行比例、积分、微分等运算的器件,它是控制系统中最重要的部分,决定了系统的性能和应用范围。

如果把图 1.1 中的控制器用计算机来代替,再配以 D/A 和 A/D,就组成了一个典型的计算机控制系统,如图 1.2 所示。

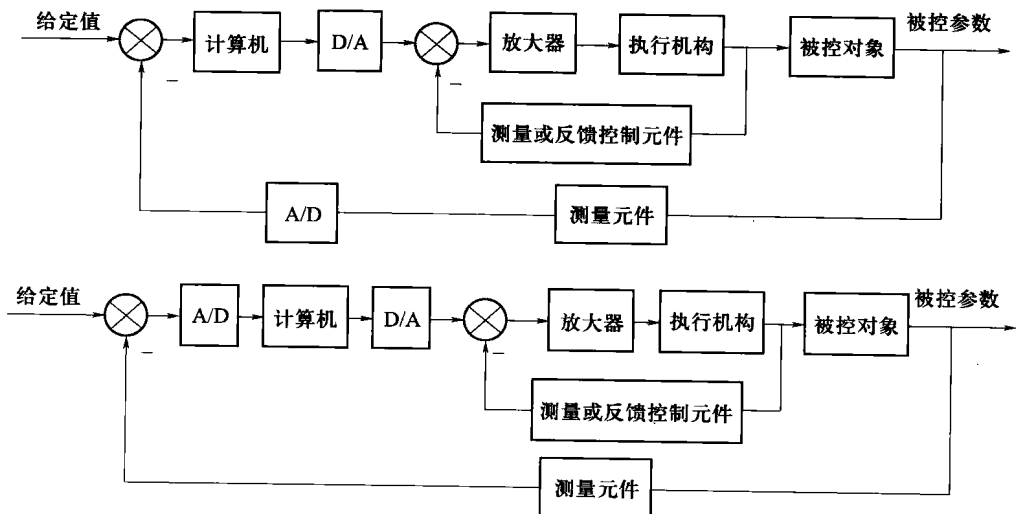


图 1.2 计算机控制系统的基本结构图

1.1.2 计算机控制系统的基本特点

计算机控制系统与连续控制系统相比,具有以下特点。

(1) 计算机控制系统是模拟和数字的混合系统。

在连续控制系统中,各处的信号是连续的模拟信号;而在计算机控制系统中,给定量和反馈量都是二进制数,因而反馈量要经过 A/D 转换器将模拟量转换为数字量。当计算机接收了给定量和反馈量后,运用计算机中的各种指令,就能对该偏差值进行运算(如 PID 运算),再经过将数字信号转换成模拟控制信号的 D/A 转换器输出到执行机构,便完成了对控制量的控制作用。

(2) 改变控制算法只要改变程序而不必改动硬件电路。

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),要改变控制规律,只要改变计算机的程序就可以了,而不必对硬件电路进行改动,因此具有很大的灵活性和适应性。

(3) 能够实现复杂的控制规律。

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) 计算机控制系统是离散控制。

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控制的。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 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,严格地讲,计算机控制系统并不是连续控制的,而是离散控制的。

(5) 一个数字控制器可同时控制多个回路。

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,可同时控制多个回路。

(6) 使自动化的程度进一步提高。

采用计算机控制,如集散控制系统、计算机网络等,便于实现控制与管理的一体化,使工业企业的自动化程度进一步提高。

在掌握自动控制理论与计算机控制技术基础上,要注意计算机引入控制系统后带来的特殊问题及其处理方法,以及与经典的控制系统设计的联系与区别。

1.1.3 计算机控制的控制过程

从信息转化与使用角度看,计算机控制的控制过程可归纳为以下四个方面。

1. 实时数据采集

对被控参数的瞬时值进行检测和输入。也就是对被控参数在一定的采样间隔进行检测,并将采样结果输入计算机。

2. 实时计算

也称为实时决策。对实时的给定值和采集的被控参数的状态量进行分析,并按已定的控制规律,决定下一步的控制过程。也就是对采集到的被控参数进行处理后,按一定的预先规定的控制规律进行控制率的计算,决定当前的控制量。

3. 实时控制

根据实时计算的结果,将控制信号作用到控制的执行机构。也就是根据前面讲的实时计算结果,或者实时决策,适时地对执行机构发出控制信号,在线、实时完成控制任务。

所谓“实时”,是指信号的输入、计算和输出都要在一定的时间(采样间隔)范围内完成,也就是要求计算机对输入的信息以足够快的速度进行处理,并在一定的时间内作出反应或进行控制,超出这个时间,就失去了控制的意义,这就是计算机控制系统最基本的功能。

如果计算机能够在要求的时间范围内及时对被控参数进行测量、计算和控制输出,称为实时控制。

4. 信息管理

随着网络技术和控制策略的发展,信息共享和管理也介入到控制系统中。

1.2 计算机控制系统的工作方式和组成

1.2.1 计算机控制系统的工作方式

1. 在线方式和离线方式

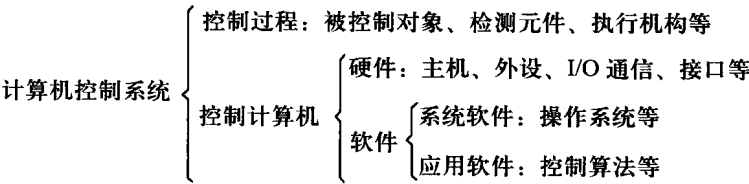
在计算机控制系统中,计算机与被控对象相连,且直接控制被控对象的方式称为在线或联机方式;相反,计算机不与被控对象相连,或相连但不直接控制被控对象,而是依靠人进行联系并作出相应操作的方式称为离线或脱机方式。

2. 实时性

实时是指信号的输入、处理和输出都必须在一定的时间范围内完成,即计算机对输入信息要以足够快的速度进行控制。控制过程是连续进行的,应用于控制的计算机控制系统也必须是一个实时控制系统。

1.2.2 计算机控制系统的组成

计算机控制系统由控制计算机和控制过程两部分组成。



1. 硬件组成

计算机控制系统的组成如图 1.3 所示。

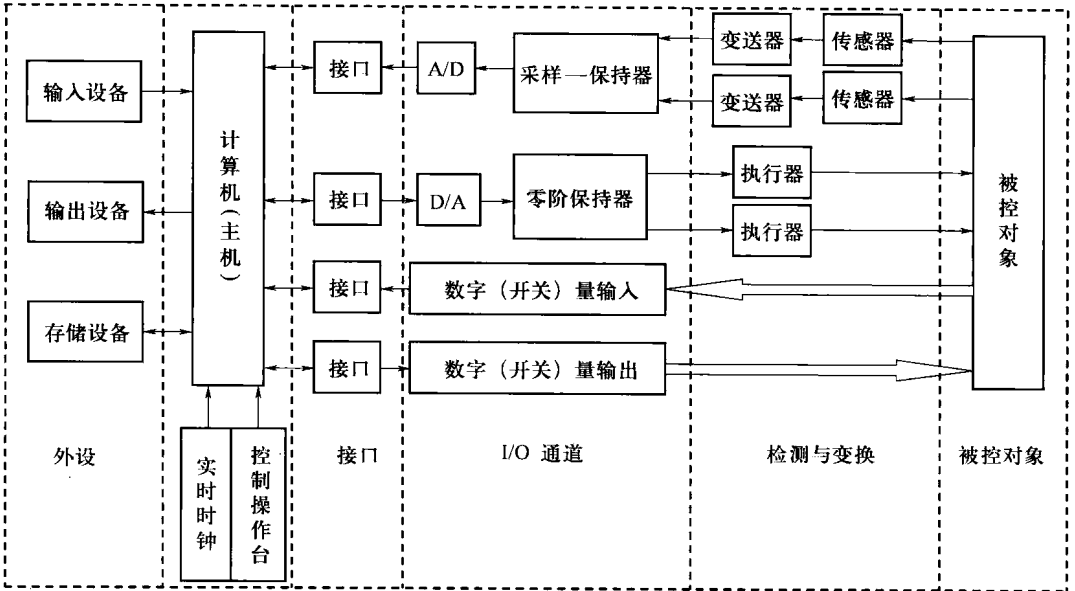


图 1.3 计算机控制系统的一般组成

系统从左向右依次解释如下。

(1) 外设。分为输入设备、输出设备和存储设备,它提供人一机对话。例如输入设备有键盘、鼠标、数字化仪等,主要用来输入程序和数据等;输出设备有显示器、打印机等,主要将各种数据和信息提供给操作人员,使其能够了解控制过程的情况。

(2) 主机。进行信息处理。

(3) 接口。供计算机主机与输入输出通道连接。一般有并行接口、串行接口和管理接口等通用接口。

(4) 输入/输出通道(I/O 通道)。I/O 通道是计算机与被控对象之间传递信息的通路。一般分为模拟量输入/输出通道、数字量输入/输出通道和开关量输入/输出通道。

(5) 检测与变换。被控对象的过程参数一般是非电物理量,必须经传感器变换为等效的电信号。传感器进行非电量到电量的转换;变送器的作用是信号变换为标准电压或电流。

2. 软件组成

计算机控制系统的硬件只是控制系统的躯体,还必须要有相应的软件才能构成完整的控制系统。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。它是系统的神经中枢,整个系统的动作都是在软件的协调指挥下进行工作的。它通常由系统软件和应用软件组成。

系统软件是指帮助人们使用和管理计算机的一些软件,具有一定的通用性,这些都由厂家提供。

应用软件是指用户自己编制的为完成自己的具体任务而编写的一些程序。如控制算法、数据处理和绘图程序、打印等。

1.2.3 导弹计算机控制系统举例

例 1.1 导弹的姿态控制系统。

图 1.4 是典型的连续控制系统,系统中的所有信号都是连续的时间变量的函数。它由俯仰角速率反馈回路、俯仰姿态角反馈回路组成。输出变量是导弹的姿态角 $\vartheta(t)$,它随给定的 $\vartheta_0(t)$ 变化。角速率反馈回路的基本作用除了为其提供足够的阻尼外,更重要的是增加回路的稳定性。俯仰角的测量不是直接由姿态陀螺测量得到,而是由速率陀螺积分得到,积分初值由火控系统装订。

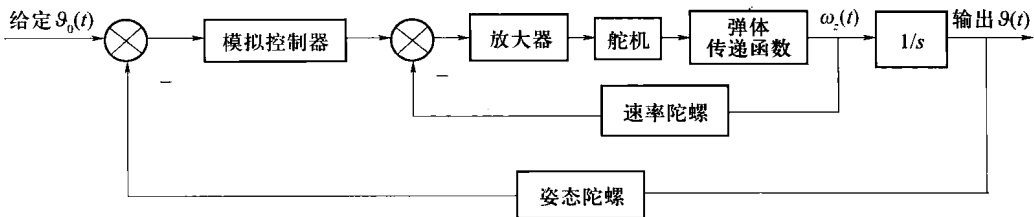


图 1.4 导弹纵向通道自动驾驶仪连续控制系统

当图 1.4 中的模拟控制器由数字控制器代替时,即为计算机控制系统,如图 1.5 所示。数字控制器实际上是由数字计算机等组成,为了使系统中的信号匹配而引入 A/D 和

D/A 转换器。比较图 1.4 和图 1.5 可以看出,连续控制系统和计算机控制系统的结构是十分相似的。

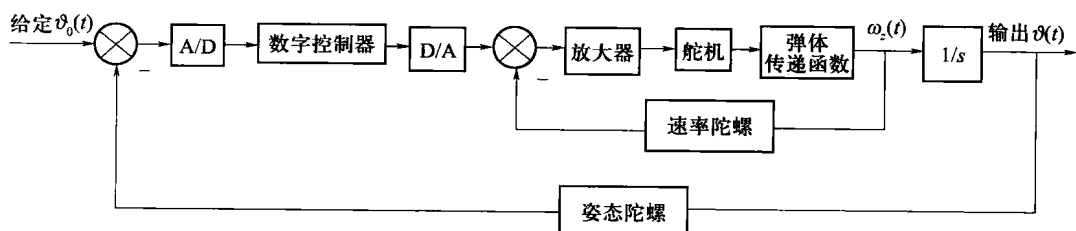


图 1.5 导弹纵向通道自动驾驶仪计算机控制系统

1.2.4 计算机控制系统的控制计算机特点

计算机控制系统是计算机在控制过程中的应用,是计算机很重要的应用领域之一,控制计算机就是为满足这一特点的应用领域而发展起来的。控制计算机,是以计算机为核心的测量与控制系统,它处理来自系统的输入信号,再根据控制要求将处理结果输出到控制器去控制被控对象,同时对控制过程进行监督和管理。

控制计算机不同于一般的计算机,对计算机有着特殊的要求。控制计算机的主要特点体现在以下几方面。

(1) 可靠性高和可维修好。

可靠性和可维修性是两个非常重要的因素,它们决定着系统在控制上的可用程度。可靠性就是指设备在规定的时间内运行不发生故障;可维修性是指控制机发生故障时,能够快速、方便、简单地维修。

(2) 环境适应性强。

由于控制环境恶劣,这就要求控制机适应高温、高湿、腐蚀、振动、冲击、灰尘等环境。控制环境的电磁干扰严重,供电条件不良,控制计算机必须要有极高的电磁兼容性。

(3) 控制的实时性。

控制机应具有时间驱动和事件驱动能力,要能对控制过程变化实时地进行监视和控制。为此,需要配有实时操作系统和中断系统。

(4) 完善的输入/输出通道。

为了对控制过程进行控制,需要给控制机配备完善的输入/输出通道,如模拟量输入/输出,开关量输入/输出、人一机通信设备等。

(5) 系统的开放性与扩充性好。

要求系统在软件与硬件上具有开放性结构,以便于系统扩充、异种机连接、软件升级和互换。

(6) 丰富的软件。

控制机应配备较完善的操作系统和适合控制过程控制的应用程序。

(7) 适当的计算机精度和运算速度。

一般控制过程对精度和运算速度要求并不苛刻,但在实际控制过程中,对于精度和运算速度的要求应根据具体的应用对象和使用方式,选择合适的机型。

1.3 计算机控制系统的分类

采用什么样的计算机控制系统与被控对象的复杂程度及控制要求有关,对象不同,要求不同,控制方案也不同。计算机控制系统一般可分为以下几种。

1.3.1 按功能分类

一、数据采集与监视系统(处理系统)

1. 结构

数据采集与处理系统结构如图 1.6 所示。

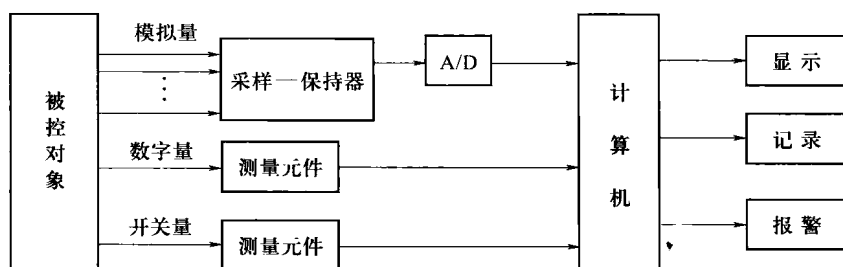


图 1.6 数据采集与处理系统结构图

2. 工作原理

在计算机的指挥下,定期地对控制过程的参数进行巡回检测、数据记录、数据计算、数据统计和整理、数据越限报警及对大量数据进行积累和实现分析。

3. 特点

计算机不直接参与过程控制。对控制过程不直接产生影响,而是由操作人员根据测量结果改变设定值或进行必要的操作。

4. 优点

(1) 对整个控制过程进行集中监视。一台计算机可代替大量常规的显示仪表和记录仪表,从而对整个控制过程进行集中监视。

(2) 对大量数据集中进行综合加工处理。得到更精确、更需要的结果,对指导控制过程有利。

(3) 利于建立理想的数学模型。因为在计算机控制系统设计的初始阶段,尚无法构成闭环系统,可根据采集到的输入和输出数据,来摸清系统的数学模型、控制规律和调试控制程序。

说明:数据采集和处理系统严格地讲不属于计算机控制系统,但由于计算机控制系统都必然包含数据采集和处理,故仍将其作为计算机控制系统的一类。

二、直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)

1. 结构

直接数字控制系统结构如图 1.7 所示。

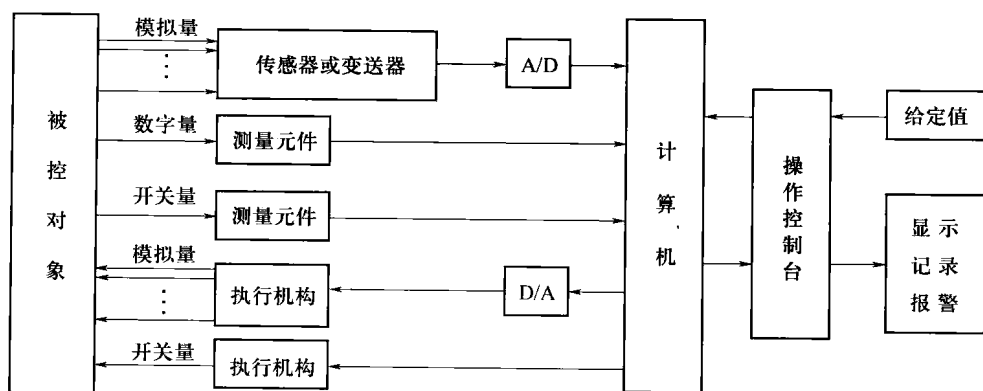


图 1.7 直接数字控制系统结构图

2. 工作原理

计算机通过过程输入通道对一个或多个被控参数进行巡回检测,并根据规定的控制规律进行运算,然后发出控制信号,通过输出通道对被控对象进行控制。

3. 特点

(1) 计算机参与了直接控制,控制系统经计算机构成了闭环。

(2) 给定值在控制过程中不发生变化。给定值是预先设定好后送给或存入计算机内的,所以控制过程中不发生变化。

4. 优点

(1) 一台计算机可取代多个模拟调节器,非常经济。这利用了计算机的分时能力,实现了多回路的 PID 调节。

(2) 实现各种复杂的控制规律只需要改变软件,而不必更换硬件。复杂的控制规律如串级、前馈、解耦、纯滞后补偿等。

三、监督控制(Supervisory Computer Control, SCC)

1. 结构

监督控制系统结构如图 1.8 所示。

2. 工作原理

在计算机控制下,不断检测控制过程的参数,并根据给定的数据、控制指令和控制规律,计算出最佳给定值,自动地改变模拟调节器或以直接数字控制方式工作的计算机中的给定值,从而使控制过程始终处于最优工作状态。

3. 特点

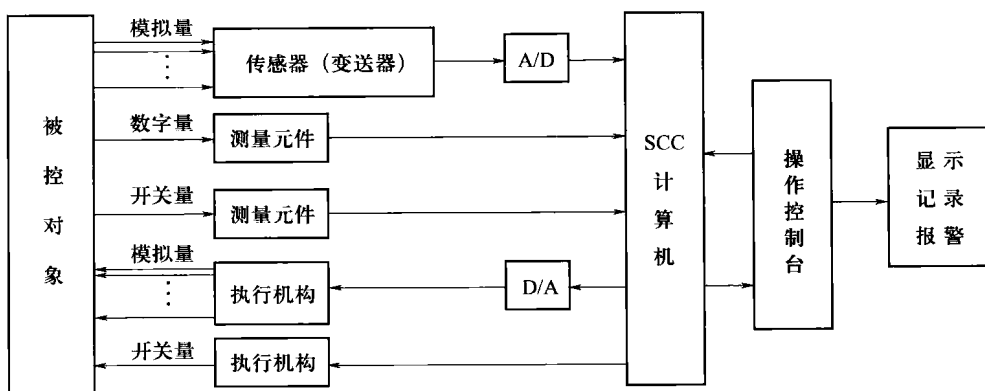
给定值是计算出来的。而 DDC 中设定值是预先给定的,不随参数或命令而改变。

4. 优点

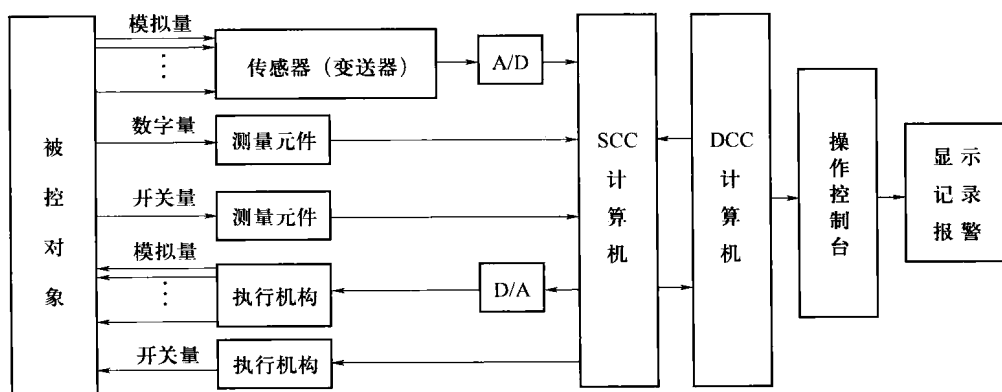
(1) 能根据控制变化,改变给定值,以实现最优控制。

(2) SCC + 模拟调节器法,既用上了原来的模拟调节器,又用计算机实现了最佳给定值控制。

(3) 可靠性好。SCC 故障时可用 DDC 或模拟调节器工作,或 DDC 故障时用 SCC



(a) SCC+ 模拟控制器



(b) SCC+DCC 系统

图 1.8 监督控制系统结构图

代之。

(4) 仍有 DDC 的那些优点。

四、集散控制系统

集散控制系统也称分布型计算机控制系统 (Distributed Computer Control System, DCCS), 它是以微处理技术为基础, 以控制技术、计算机技术、通信技术和屏幕显示技术为核心的基本控制器, 实现了地理和功能上的分散控制, 又通过数据通道把各个分散点的信息集中起来送到监控计算机和操作站, 以进行集中监视和操作, 并实现高级复杂规律的控制, 构成了一种新的控制系统。其结构图如图 1.9 所示。

图 1.9 中, 测量是指数据采集装置, 用来收集控制过程变化和现场控制信息。基本控制器的功能是完成现场控制任务。测量装置与基本控制器将现场信号进行预处理后, 经高速数据通道送入上位计算机。基本控制器可以是数字的, 也可以是模拟控制装置。显示操作站是人—机接口装置, 完成显示操作任务。监控计算机的功能是协调基本控制器, 完成生产过程的动态优化任务。

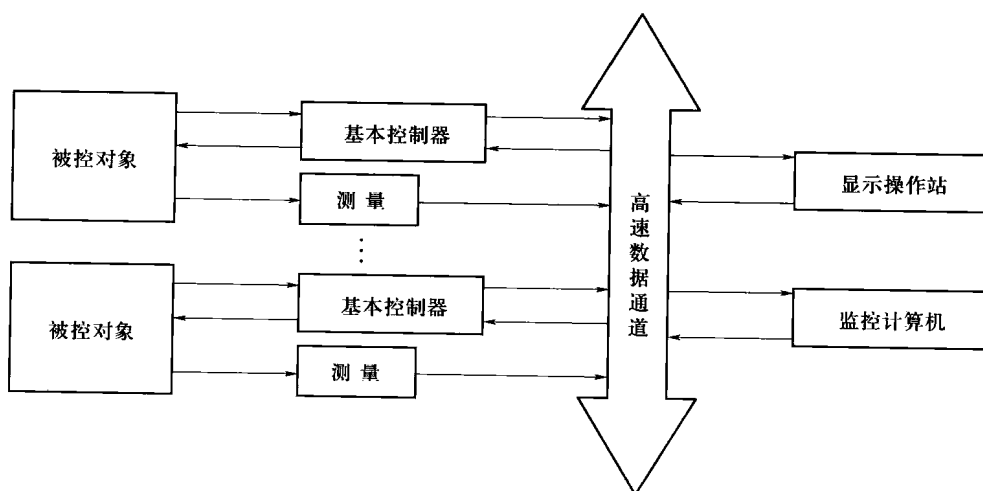


图 1.9 集散控制系统结构图

1.3.2 按控制规律分类

1. 程序控制和顺序控制

程序控制:被控制量按预先规定的时间函数变化。

顺序控制:它相当于多个程序控制的相互连接和转换。即从一个程序控制按规定的“时间”或“条件”转换到另一个程序控制。它可以看作是程序控制的扩展,在各个时期所给出的设定值可以是不同的物理量,而且每次设定值的给出,不仅取决于时间,还取决于对以前的控制结果的逻辑判断。

2. PID 控制

这是用途最广、工程技术人员最熟悉的一种控制规律。

3. 最少拍控制

这是一种设计成使系统能在最少采样周期里完成调节过程的控制,也称为最短时间控制或时间最优控制,多用于数字随动系统设计。

最少拍控制将在第 6 章中详细讲解。

4. 复杂规律的控制

常指串级控制、前馈控制、纯滞后补偿控制、解耦控制、最优控制、自适应控制等。

5. 智能控制

智能控制理论可以看作是人工智能、运筹学和控制理论三个主要理论领域的交叉或汇合,它实质上是一个大系统,是综合的自动化系统。

1.4 计算机控制系统的研究内容和基本要求

1.4.1 计算机控制系统的研究内容

控制系统虽然有不同的类型,但其研究内容却是相似的。