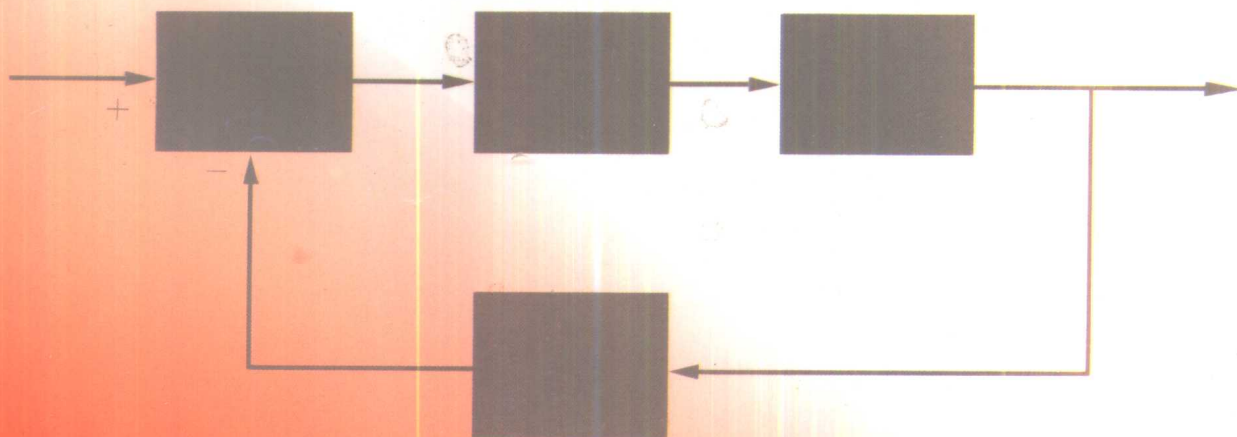


计算机控制系统

张宇河 金 钰 编著



北京理工大学出版社

计 算 机 控 制 系 统

张宇河 金 钰 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书从工程实用观点出发,讲解计算机控制系统的原理,介绍通道接口技术和数字PID、模拟化方法、离散化方法、状态空间法等四种数字控制器设计方法以及计算机控制的应用实例。

本书为自动控制系统专业大学本科必修教材,可做为工业自动化专业、计算机应用专业的教学参考书,也适合于从事计算机应用的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统/张宇河,金 钰 编著. —北京:北京理工大学出版社,1996 (1998.9 重印)
ISBN 7-81045-036-0

I. 计… II. ①张… ②金… III. 电子计算机-控制系统-高等学校-教材 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 01509 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码 100081 电话 (010) 68912824

各地新华书店经售

北京市蓝地公司激光照排

北京房山先锋印刷厂印刷

*

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 374 千字

1996 年 4 月第 1 版 1998 年 9 月第 2 次印刷

印数: 4001—6500 册 定价: 19.50 元

前 言

数字计算机由于其具有强大的算术运算、逻辑判断、记忆等信息加工能力，使得它一诞生就被应用到控制领域。随着计算机科学与技术的发展，使 60 年代兴起的现代控制理论得到应用，而现代控制理论的发展，又为计算机控制的发展奠定了广阔的理论基础。特别是微电子技术的发展给计算机控制提供了物质基础。现在在工业生产等领域中，计算机控制正广泛深入地得到应用，并取得了可喜的经济效益和社会效益。

为适应当前科学技术的发展，在自动控制系统专业中开设了《计算机控制系统》这门课程，作为本科生的必修课。本书就是为这门课程的教学而编写的。选材力求工程实用，以使学生通过本门课程的学习，能掌握计算机控制系统设计较完整的知识和基本的设计技能。

全书共分九章：第一章概述计算机控制系统的一般概念；第二章通道接口技术，主要讲解计算机控制系统的硬件设计；第三章到第六章分别介绍四种实用的数字控制器的设计方法，它们是：数字 PID 控制器设计、模拟化设计方法、离散化设计方法、状态空间设计方法；第七章讨论数字控制器由计算机实现时所遇到的特殊问题——量化效应；第八章为适应机电一体化发展的需要，介绍计算机在机床业和顺序控制方面的应用即数控与可编程控制器；第九章介绍了计算机控制系统的实例，这些实例都是编著者及其同事近年来在计算机控制方面的科研成果。

本书第一、二、四、八、九章由张宇河执笔，第三、五、六、七章及附录由金钊玉执笔，全书由张宇河统编。书稿经北京工业大学计算机学院肖春林教授仔细审阅，并提出许多宝贵意见。

由于编著者水平有限，书中定有不当之处和错误的地方，欢迎读者批评指正。

编 著 者

1995.2

目 录

第一章 概 述	(1)
§ 1 计算机控制系统的一般概念	(1)
§ 2 计算机控制系统的组成	(2)
§ 3 计算机控制系统的分类	(4)
第二章 通道接口技术	(8)
§ 1 计算机对外围通道的控制	(8)
§ 2 模拟量输出通道	(15)
§ 3 模拟量输入通道	(35)
§ 4 通道的抗干扰问题	(51)
第三章 数字 PID 控制器设计	(56)
§ 1 概述	(56)
§ 2 数字 PID 控制	(56)
§ 3 数字 PID 的改进算法	(60)
§ 4 数字 PID 控制器参数选择	(65)
§ 5 常用的 PID 控制系统	(69)
第四章 数字控制器的连续设计方法	(71)
§ 1 使用连续设计方法的条件	(71)
§ 2 连续化设计步骤	(72)
§ 3 $D(s)$ 的离散化方法	(73)
§ 4 各种离散化方法的比较	(81)
§ 5 设计举例	(85)
第五章 数字控制器的离散设计方法	(91)
§ 1 概述	(91)
§ 2 解析设计法	(91)
§ 3 z -平面上的根轨迹设计法	(109)
§ 4 频率响应设计法 (w' -平面设计)	(120)
第六章 计算机控制系统的状态空间设计方法	(134)
§ 1 概述	(134)
§ 2 状态反馈极点配置	(134)
§ 3 状态观测器	(149)
§ 4 用观测状态反馈的调节器设计	(159)
§ 5 有输入作用的系统	(163)
第七章 数字控制器的计算机实现及量化误差分析	(169)
§ 1 数字控制器的实现	(169)
§ 2 三种量化误差	(174)
§ 3 输出信号量化误差	(177)
§ 4 死区和极限环	(179)
§ 5 数字控制器实现的其他问题	(182)

§ 6 字长的选择	(183)
第八章 数控与可编程控制器	(184)
§ 1 数控	(184)
§ 2 可编程控制器	(193)
第九章 实 例	(205)
§ 1 计算机控制系统的抗干扰措施	(205)
§ 2 钨极脉冲氩弧焊接参数微机控制系统	(210)
§ 3 喷砂机器人	(218)
§ 4 随动系统通用数字控制器	(229)
附录 Z—变换表	(236)
参考文献	(238)

第一章 概 述

§ 1 计算机控制系统的一般概念

自动控制技术在工业生产中已获得了广泛应用。尽管工业生产中的自动控制系统随控制对象，控制品质要求的不同有很大的差别，但是一般分成开环、闭环两种控制系统。下面以电气传动系统为例来说明控制系统的一般概念。

开环控制系统

图 1-1 是开环电气传动系统。通过改变给定电位器滑臂的位置可以改变输出脉冲宽度，经功率放大之后，达到调节电动机转速和方向。这种控制方式，控制性能很差，被控制量电动机的转速会因电网电压和负载的波动而波动，这将影响系统的工作质量。因此开环控制方式只能应用在对控制质量要求不高的场合。

闭环控制系统

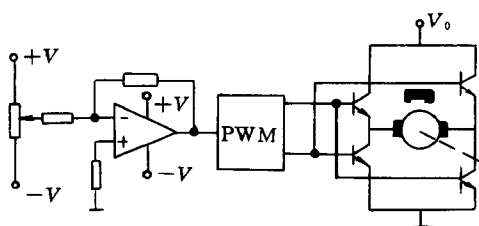


图 1-1 开环系统

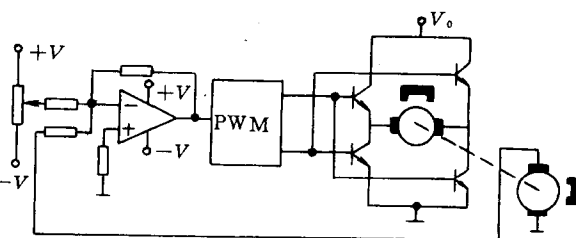


图 1-2 闭环系统

应用反馈控制理论对图 1-1 的开环控制系统进行改造，可以得到图 1-2 闭环控制系统。图中采用测速发电机对被控参数转速进行检测，然后引到系统的输入端与给定值进行比较，一旦发现输出转速波动，通过调节电机电枢电压使电机转速得到稳定。为了改善闭环系统的动态品质和稳态精度，系统中的控制器可设计成各种形式。

由上可见，一个闭环控制系统需要对被控参数进行检测，然后与给定值比较，再对误差信号进行加工，最后去控制执行机构。控制框图如图 1-3 所示。信号检测与控制器是控制系统中两个关键部分，它影响着控制系统的控制质量。

如果把图 1-3 中的控制器用计算机来代替，就可以构成最基本的计算机控制系统。为使计算机处理的数字信号与执行机构处理的模拟信号能够协调起来，系统中必须加入两种变换器，即将检测装置检测到的模拟信号转换成数字信号的 A/D 转换器和将数字控制器输出的数字信号转换成模拟信号的 D/A 转

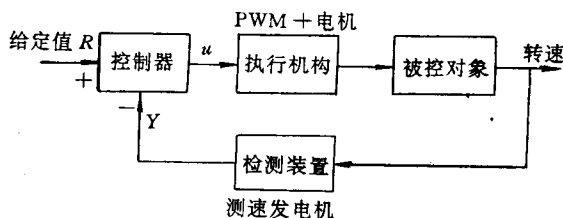


图 1-3 控制系统框图

换器。这样一个计算机控制系统的框图如图 1-4 所示。

系统中的控制器是由计算机的控制算法程序实现的,被控参数的数据采集器 A/D 转换器和控制器输出的 D/A 转换器都只能是周期性工作,因此控制系统引入计算机之后就成为离散时间控制系统。其工作过程是:

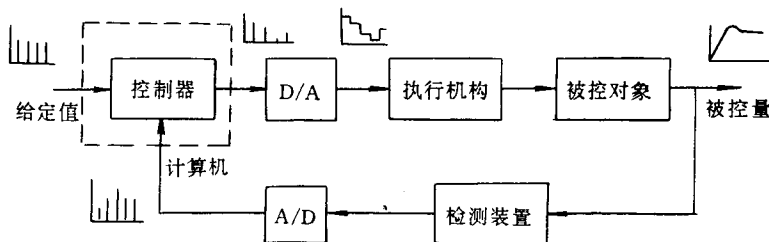


图 1-4 计算机控制系统框图

- 实时数据采集。对被控参数的瞬时值进行检测、转换并输入到计算机中；
- 实时决策。对采集到的表征被控参数的状态量进行分析,并按已定的控制规律进行计算,决定进一步的控制策略；
- 实时控制。根据决策,适时地对执行机构发出控制信号。

计算机控制系统就是不断重复上面三个步骤控制整个系统按一定的品质指标进行工作,并且对被控参数和设备本身出现的异常状态还能进行监督和及时处理。控制过程的三个步骤对计算机来说实际上只是执行算术、逻辑运算和输入输出操作。

我们把生产设备是否直接受计算机控制分成“联机”(或“在线”)方式和“脱机”(或“离线”)方式。上面所讲的计算机控制系统,计算机直接与被控对象联接在一起并对被控对象进行控制,因此是“联机”工作方式。如果一个生产设备不直接受计算机控制,而是通过中间记录介质如磁带、磁盘等,靠人进行联系并作相应操作就是“脱机”工作方式。因此“脱机”方式不能实时地对系统进行控制。

所谓“实时”是指信号的输入、计算和输出都是在一定的时间范围内完成。亦即计算机对输出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。实时性指标取决于下列时间延时:检测仪表延时、过程输入(A/D)延时、计算机运算延时、数据传输(D/A)延时等等。

§ 2 计算机控制系统的组成

由于数字计算机具有强大的运算、存储、逻辑判断等信息加工能力,因此在它一诞生,控制工程师们就热衷于研究如何将它应用到控制系统中。早期计算机体积大、速度低、价格高,只能应用在例如炼油厂、化工厂等被控参数是慢变化的过程,而且用一台计算机去控制相当多的控制回路以期减少成本。进入 60 年代以后,随着小型计算机的出现,计算机的尺寸和价格逐渐降低,使得计算机可以应用到较小的和价格较低的控制系统中。70 年代以后出现了微处理器,进一步扩大了计算机的应用范围,现在出现了数字控制硬件价格可以与模拟控制硬件价格相竞争的境地。随着集成电路规模的提高,数字硬件从体积、重量、功率消耗到可靠

性方面都有很大提高,由这些器件组成的系统甚至可以达到平均无故障时间超过 60 年这样的指标。现在在过程控制中已出现了采用单片微型机的单回路调节器,完全取代了模拟调节器,而且具有智能化。

尽管计算机控制系统随着服务对象的不同其组成的规模也不同,但是针对工业控制中的应用,其基本组成是相同的。一般分为硬件和软件两大部分。

2.1 硬件的组成

图 1-5 是计算机控制系统硬件组成框图。它包括计算机、标准外部设备、输入输出通道

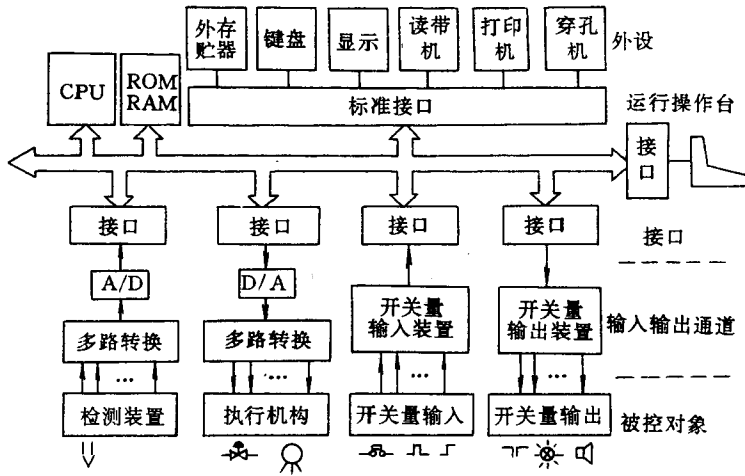


图 1-5 计算机控制系统硬件组成

(又称外围通道)、接口、运行操作台、被控对象等。

- 计算机 它是控制系统的核心,由 CPU, ROM, RAM 组成。它根据输入通道送来的被控对象的状态参数,按照预先安排好的程序,自动进行信息处理、分析、计算、并作出相应的控制决策,然后以信息的形式通过输出通道发出控制命令,控制被控对象进行工作。

- 标准外部设备 一般有三类:输入设备,输出设备和外存贮器。它根据系统的功能来决定配置的多少。

输入设备有键盘、纸带输入机(读带机)等,主要用来输入程序和数据。

输出设备有显示器、打印机、穿孔机等,主要用来将控制过程中的各种信息、数据按人们容易接收的形式,如数字、曲线、字符等提供给操作人员以便及时了解控制过程。

外存贮器有磁带、磁盘等,用来存贮系统程序、应用程序、数据。

- 输入输出通道 工业现场的被控参数往往是一些非电量(如温度、压力、流量、转速、位移……),首先必须用传感器(检测装置)将它转换成电信号,并通过建立在计算机与检测装置之间的信息传递与变换通道——输入、输出通道,与计算机进行联系,实现信息采集与控制。输入、输出通道一般分模拟量输入通道、模拟量输出通道,开关量输入通道、开关量输出通道。

- 接口 它是沟通计算机与外设、外围通道的桥梁。通过接口电路的协调工作,实现信

息和命令的传送。

· 运行操作台 标准的外部设备可以用作操作人员与计算机人机对话的工具, 程序人员和维修人员可以使用这些设备检查系统的故障。但是生产过程操作人员不一定了解这些外设的使用方法, 一旦操作失误, 将会造成不良后果。而操作人员又必须跟计算机控制系统进行“对话”以便了解生产过程状态, 适当修改控制参数, 或者在系统发生故障时进行人工干预。因此需要一套专供操作人员使用的控制台, 称为运行操作台。操作台应包括有: 显示器, 用来显示操作人员希望了解的内容, 如系统的运行数据或故障信息; 功能键, 供操作人员发送命令, 使系统执行有关动作; 数字键, 用来输入某些数据或修改控制参数。操作台的设计必须保证安全可靠, 即使操作错误也不应造成严重后果。

2.2 软件的组成

对计算机控制系统来说, 硬件只是控制系统的躯体, 而各种程序才是控制系统的大脑和灵魂。我们把各种程序通称为软件。因此所谓软件是计算机中使用的所有程序和有关资料的总称, 它关系到计算机的正常运行和硬件功能的发挥。

软件通常分两大部分: 系统软件、应用软件。

· 系统软件 一般由计算机生产厂提供, 有一定的通用性, 它包括:

程序设计系统: 如语言加工系统, 编译系统;

操作系统: 组织和管理计算机的硬件资源协调系统工作。对于某些专用的计算机则为监控程序或管理程序;

诊断系统: 为保证计算机软硬件的可靠运行的程序, 如检查 RAM, ROM、检查数据传输的正确性、软件运行是否出错等。

· 应用软件 它是为执行具体任务而编制的用户程序, 因控制对象的不同而异, 一般由用户自行建立, 生产厂有时也提供其中的通用部分。应用程序究竟使用哪一种语言来编制, 取决于控制系统中软件配备情况和整个系统的要求。

工业控制中应用软件一般有:

监视程序: 巡回检测程序, 数据处理程序, 越限报警程序, 操作台服务程序;

控制计算程序: 开环控制程序, 闭环控制程序, 事故处理程序;

公共应用程序: 制表打印程序, 服务子程序库 (十化二, 二化十, 定点运算, 浮点运算, 函数运算等)。

§ 3 计算机控制系统的分类

计算机控制系统从历史形成和目前应用的状况可以分成如下几类:

3.1 数据采集与处理系统

如图 1-6 所示。这是计算机应用于工业生产过程中最早的一种形式。计算机通过模拟量输入通道对生产过程中的被检测量进行采样, 经 A/D 转换器转换成数字量输入到计算机中, 然后由计算机对采集的数据进行必要的处理, 如数字滤波、仪表误差修正、越限比较, 最后定时打印制表或者按操作人员的要求随时打印, 选点显示。当有异常情况时发出声、光报警。这

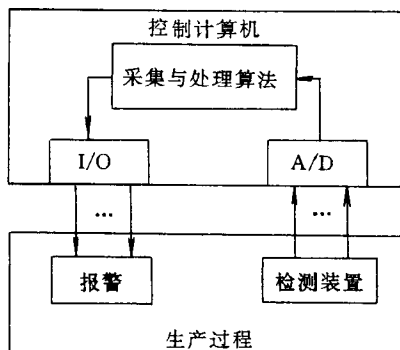


图 1-6 数据采集与处理系统

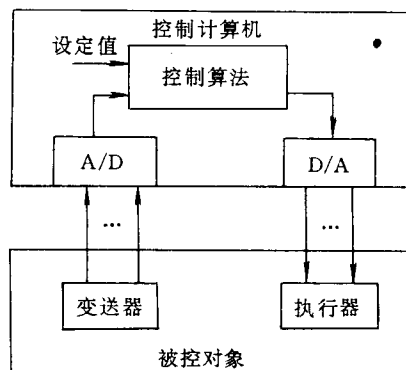


图 1-7 DDC 系统

类系统主要是利用计算机帮助操作人员及时了解生产情况，收集反映现场的资料，有利于建立生产过程的数学模型。

3.2 直接数字控制(DDC)系统

直接数字控制 (Direct Digital Control) 这个名字是为了强调计算机直接控制生产过程这一特征。图 1-7 是其框图，它是在数据采集与处理系统的基础上发展起来的。计算机采集到被控参数之后，通过数据处理，计算出控制量，经由模拟量输出通道去控制执行机构，使被控对象按给定值变化。由于直接数字控制系统直接作用于生产过程，因此要求计算机有较高的可靠性和较低的价格。早期的直接数字控制采用集中控制方式，用增加控制回路数来降低控制系统的价格，结果可靠性得不到保证，一旦计算机发生故障，势必造成整个装置停止工作。随着微处理器技术的飞速发展，现在每个微处理器控制回路数大大减少，甚至可以实现单回路控制。这样就使直接数字控制由集中型向分散型转移，于是出现了“控制分散、信息集中”的集散型控制系统。

3.3 集散控制系统 (DCS)

集散控制系统 (Distributed Control System) 又名分布式控制系统，其简图如图 1-8 所示。

生产过程本身构成的系统就是分散型的，各部分大多数是同时并行动作，因此产生分散化的思想是必然的。所谓分散化，就是使控制系统成为各式各样子系统的集合。然后用为数不多的几种硬件把这些子系统连接起来，实现信息集中，用软件实现控制功能的多样性，以最大限度地提高生产效益。

集散型控制系统实质是利用计算机技术对生产过程进行集中监视、操作、管理和分散控制的一种新型控制技术。它是由计算机技术、信号处理技术、测量控制技术、通信网络技术和人机接口技术相互发展、渗透而产生的。概括起来由集中管理部分，分散控制监测部分和通信部分组成。集中管理部分又可分为工程师站、操作站和管理计算机。工程师站主要用于组态和维护，操作站则用于监视和操作，管理计算机用于全系统的信息管理和优化控制。分散控制监测部分按功能可分为控制站、监测站或现场控制站，它用于控制与监测。通信部分

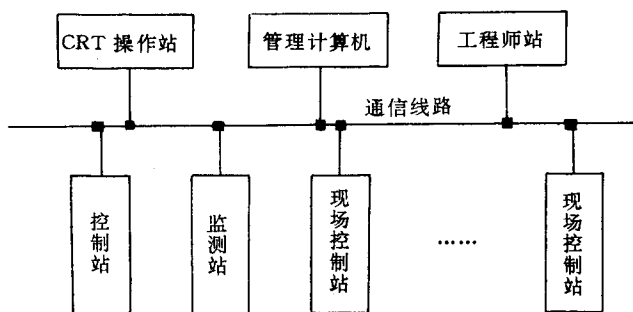


图 1-8 DCS

连接集散型控制系统的各个分布部分，完成数据、指令及其它信息的传递。集散型控制系统软件是由实时多任务操作系统、数据库管理系统、数据通信软件、组态软件和各种应用软件所组成。使用组态软件这一工具，就可生成用户所要求的实用系统。

集散型控制系统具有通用性强、系统组态灵活、控制功能完善、数据处理方便、显示操作集中、人机界面友好、安装简单规范化，调试方便、运行安全可靠的特点。它能够适应工业生产过程的各种需要，提高生产自动化水平和管理水平，提高产品质量，降低能源消耗和原材料消耗，提高劳动生产率，保证生产安全，促进工业技术发展，创造最佳经济效益和社会效益。

3.4 递阶控制系统

集散系统进一步向上联网，和上层的管理信息系统一起构成递阶控制系统（Hierarchical Control System）。随着计算机技术的发展，人们把注意力转向工厂的生产效率、能源消耗、利润指标等管理信息方面，于是就把生产过程的监控与科学化的企业管理结合起来。递阶控制系统一般分成四级，如图 1-9 所示。

1. 直接控制级

在这一级上，过程控制计算机直接与现场各类装置（如变送器，执行器，记录仪表等）相连，对所连接的装置实施监测、控制，同时它还向上与第二层的计算机相连，接收上层的管理信息，并向上传递装置的特征数据和采集到的实时数据。

2. 过程管理级

在这一级上的过程管理计算机主要有监控计算机、操作站、工程师站。它综合监视过程各站的所有信息，集中显示操作，控制回路组态和参数修改，优化过程处理等。

3. 生产管理级

在这一级上的管理计算机根据产品各部件的特点，协调各单元级的参数设定，是产品的总体协调员和控制器。

4. 经营管理级

经营管理级	第四层
生产管理级	第三层
过程管理级	第二层
直接控制级	第一层
工业过程	现场设备

图 1-9 递阶控制系统

这一级居于中央计算机上,并与办公室自动化连接起来,担负起全厂的总体协调管理,包括各类经营活动,人事管理等。

习题与思考题

1. 试举一个电炉温度控制系统例子,画出控制框图,说明其工作原理。
2. 画出计算机控制系统的框图,说明其工作过程,比较和连续系统有什么异同点?
3. 一个计算机控制系统的采样周期的最小值受到什么因素限制?
4. 计算机控制系统的硬件、软件各由哪几个部分组成,有什么功能。

第二章 通道接口技术

本章主要介绍计算机控制系统的硬件构成,包括计算机如何对外围通道的控制、模拟量输入通道、模拟量输出通道。由于开关量的输入输出可归结为模拟量输入输出通道中的某一位,因此本章不专门介绍。

§ 1 计算机对外围通道的控制

计算机对外围通道的控制,一般说来其工作基础是中断系统,具体实施是通过接口电路进行的,计算机的输入输出指令及其有关的逻辑提供了 CPU 使用外围通道的全部控制信号。因此这节我们要重点介绍指令、中断、接口三个问题。

1.1 输入输出指令

1. 输入输出接口的两种编址方式

计算机与外围通道的连接一般要用到地址总线、数据总线、控制总线。如图 2-1 所示。当外围通道地址确定之后, CPU 可以对该地址执行指令。执行读指令,可以把外围通道的数据传送到 CPU; 执行写指令, CPU 的数据传给外围通道。

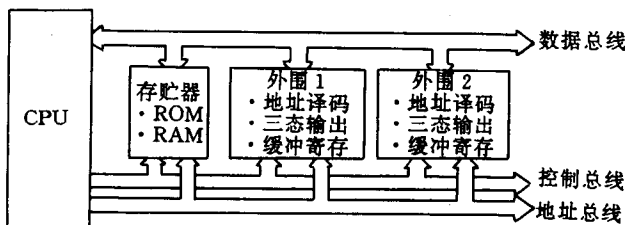


图 2-1 三总线

外围通道的地址对 CPU 来说有两种编址方式:一种是按存储器布局,即将外围通道的地址分配在存储器的地址空间,因此又称为存储器映

象 I/O。对于 M6800、6502、8031、8098 等 CPU 的计算机只能采用这种编址方式。此时计算机对外围通道的输入输出操作就像对一个存储单元读写操作一样,所有访问内存的指令均可以适用于输入输出。由于这种编址方式不必区分是输入输出还是访问内存,因此 CPU 的指令系统中没有设置输入、输出指令。

我们以 Z80 指令为例,

LD A, (nn) 指令可以实现输入操作,

LD (nn), A 指令可以实现输出操作。

一种简单实用的输入、输出与存储器统一编址方式是用地址总线最高位 A_{15} 做为选择线,控制信号的连接如图 2-2 所示。

当 $A_{15}=0$ 时, (0000H~7FFFH) 为 32K 内存地址空间;

当 $A_{15}=1$ 时, (8000H~FFFFH) 为 32K I/O 地址空间。

这种输入输出的存储器编址方式的优点是访内存的指令多,而且功能强,因此输入输出寄存器可以直接参与运算;可与存储器共用地址译码与控制电路;I/O 地址数几乎是不受限制

的。缺点是 I/O 要占用内存地址空间；需要全字长的地址译码；程序中较难区分是否为 I/O 操作。

第二种是按输入、输出布局。这种方式外围通道与存储器分开编址，又称隔离 I/O。这种编址方式，CPU 有专门的输入输出指令，并有相应的控制线指示是 I/O 操作。例如 Z80 的 I/O 请求信号 $\overline{\text{IORQ}}$ ，8086 的 $\text{M}/\overline{\text{IO}}$ 。80 系列的 CPU 如 Z80、8085、8086 等均可采用这种编址。图 2-3 示出了 Z80CPU I/O 编址方式所用的控制信号。

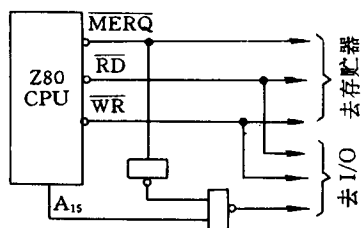


图 2-2 存储器编址

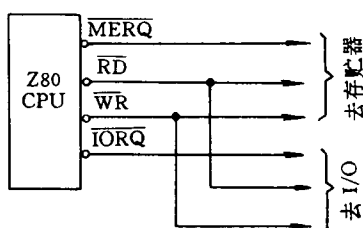


图 2-3 I/O 编址

输入输出布局的优点是 I/O 地址线少，译码简单；使用 I/O 指令，程序中易于识别。缺点是只能使用 I/O 指令，处理能力不如存储器布局强。

2. 输入输出指令和时序

了解了外围通道的两种编址方式之后，我们就知道选用不同编址方式需要使用不同指令。对于使用 68 系列、8031 等 CPU 的计算机，只能采用存储器布局，相应的只能使用访问存储器指令。而 80 系列等 CPU，可由设计者根据需要任意选用。

下面介绍指令时序。了解时序的目的是使大家知道一条指令执行的过程中，CPU 能提供给用户哪些信号，这些信号相互之间时间配合上的关系，要求接口电路设计者所选用的输入三态门电路和输出寄存器的动作时序要与指令时序相一致。

以 Z80 CPU 直接寻址的输入、输出指令为例。指令格式是：

IN A, (n); A ← (n) 输入指令

OUT (n), A; (n) ← A 输出指令

n 是通道的端口地址，它为一个字节，在指令执行时，端口地址要出现在地址总线的低 8 位上。输入指令的功能是把端口地址为 n 的数据(或状态)送到计算机的累加器 A；输出指令的功能是把累加器 A 的数据送到端口地址为 n 的寄存器中。

每条指令的执行都是在统一时钟脉冲控制下一个节拍一个节拍地进行。指令执行过程所需的时钟脉冲称为指令周期。上述输入输出周期的时序如图 2-4 所示。

当 CPU 从程序计数器所指定的内存单元中取出的指令是输入或输出指令时，经指令译码后确定的操作是， T_1 时钟周期上升沿后，输入或输出端口地址出现在地址总线的低八位，在 T_2 周期的上升沿之后，输入输出请求线 $\overline{\text{IORQ}}$ 和读 $\overline{\text{RD}}$ 或者写 $\overline{\text{WR}}$ 变为有效。紧接着 CPU 在 I/O 操作时自动插入等待周期 T_w ，这是因为在 $\overline{\text{IORQ}}$ 有效到 T_2 下降沿采样 $\overline{\text{WAIT}}$ 线的时间间隔十分短，在没有 T_w 周期时，即使 I/O 端口要求等待也没有足够时间发出 $\overline{\text{WAIT}}$ 申请，同时没有 T_w 周期，也很难设计 MOS I/O 装置能在这样的速度下工作。这样 CPU 在自动插入的 T_w 周期的下降沿再采样 $\overline{\text{WAIT}}$ 线以决定是否要插入等待周期 T_w 。在输入时，以 $\overline{\text{IORQ}}$ 和 $\overline{\text{RD}}$

作为通道的选通信号,使端口数据上到数据总线, CPU 在 T_3 周期的下降沿将数据输入到累加器 A。从时序图上可见, $\overline{\text{IORQ}}$ 和 $\overline{\text{RD}}$ 有效到数据上到数据总线允许约 $2T$ 时间, 对于 2.5MHz 时钟的 CPU, 要求输入端口三态缓冲器的响应时间要小于 $2T=800\text{ns}$ 。在输出时, CPU 在 T_1 周期的下降沿后把输出的数据送到数据总线, 并且保持整个指令周期。当 $\overline{\text{IORQ}}$ 和 $\overline{\text{WR}}$ 信号使通道寄存器选通时, 在 T_3 周期的下降沿之后 $\overline{\text{WR}}$ 信号失效, 将数据送入通道寄存器。对于 2.5MHz 时钟的 CPU, $\overline{\text{WR}}$ 信号有效时间约为 1000ns, $\overline{\text{WR}}$ 失效后有效数据约保持 120ns 后再消失, 这就要求通道的寄存器能适应这一关系。

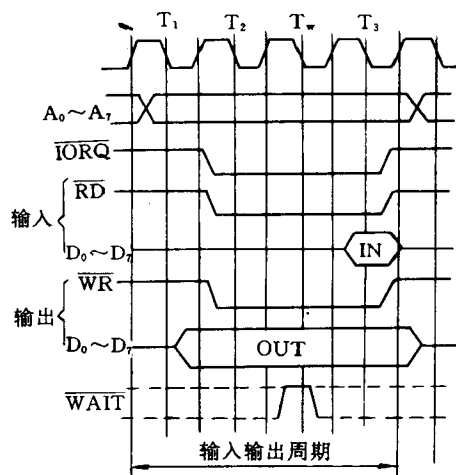


图 2-4 输入输出时序

下面再介绍一种以存储器布局方式工作的 8098 单片机对外部存储器或 I/O 操作的时序。8098 单片机有多种运行方式, 最常用的是标准总线方式, 它使用 16 位多路复用地址和 8 位数据总线。CPU 通过与 8 位数据总线复用的 16 位地址总线 $\text{AD}_0\text{—}\text{AD}_7$ 、 $\text{A}_8\text{—}\text{A}_{15}$, 来对外部存储器或 I/O 进行寻址。为了将总线上的地址和数据信号分离, 8098 提供了地址锁存允许信号 ALE, 利用其下降沿给一个锁存器 (例如 74LS373) 送一个信号, 用以锁存来自 $\text{AD}_0\text{—}\text{AD}_7$ 的低 8 位地址。

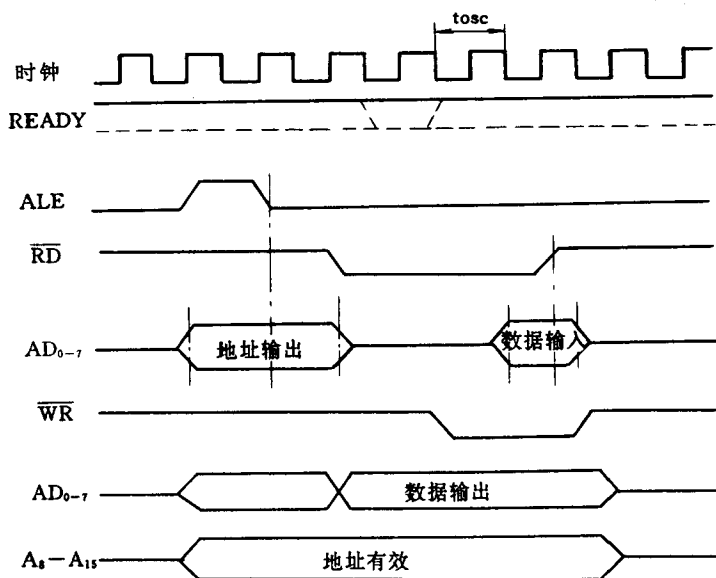


图 2-5 8098 I/O 时序

图 2-5 为 8098 对外部存储器或 I/O 进行操作的理想定时波形。当对外存储器或 I/O 进行操作时, ALE 变高, 16 位地址从 $\text{AD}_0\text{—}\text{AD}_7$ 和 $\text{A}_8\text{—}\text{A}_{15}$ 引脚送出。其后 ALE 变低, $\text{AD}_0\text{—}\text{AD}_7$

被锁存而 A_8-A_{15} 一直有效。

读操作：在读外部存储器或 I/O 期间，存储器或 I/O 的数据必须在 $\overline{RD}$ 信号上升沿出现之前放到 AD_0-AD_7 总线上并稳定下来。这一稳定时间称为数据建立时间，8098 在 $\overline{RD}$ 信号的上升沿将总线上的数据读入片内。

写操作：对外部存储器的写操作时序与读操作相同，在 $\overline{WR}$ 信号的下降沿后，8098 从总线上撤消地址信号的同时送出所要写入的数据。当 $\overline{WR}$ 变为高电平时，则数据被锁存到外部存储器。

为了实现对低速存储器或 I/O 的存取，8098 还提供一个准备就绪 (READY) 信号，用以展宽读和写信号的宽度。假如 READY 信号在 ALE 信号下降沿后的规定时间内变为低电平，那么在时钟信号的下降沿到来之前，8098 总线上的状态保持不变（即插入了等待状态）。当 READY 信号变为高电平后，在下一个时钟信号的下降沿，总线操作将继续进行。

从上面两个例子可以看出，尽管时序的形式不同，但是对 I/O 的接口要求是一样的。

1.2 中断

计算机与外围通道之间传送数据的方式通常有两种：DMA 传送和程序传送。

DMA 传送较复杂，需要有专门的 DMA 控制器，控制外围设备与存储器之间直接存取。这种传送方式适用于高速、大批量数据传送，大多用于数据采集系统，一般的控制系统较少采用。

程序传送可分：握手方式；查询方式；中断控制方式。

握手方式如图 2-6 所示。CPU 向外围通道发出启动命令之后，外围通道开始工作，进入忙状态，将通道忙信号引入 CPU，使 CPU 在通道工作期间一直处于等待状态。待外围通道工作结束，解除 CPU 等待状态，CPU 立即读出数据。这种方式适用于外围通道工作时间在几十微秒以下的系统，不适用于低速系统，因为使用这种方式 CPU 等待时间将很可观。

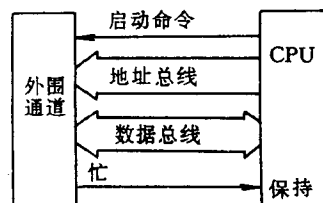


图 2-6 握手方式

查询方式是 CPU 启动外围通道工作之后，就不停地读进外围通道的工作状态，一旦发现“忙”状态解除，就立即读进通道的数据。为了不使 CPU 的时间白白浪费在查询上，也可以在 CPU 发出启动命令之后，就去执行别的程序，每隔适当的程序步再去查询外围通道的工作状态。这两种作法，要么浪费计算机机时，要么响应不及时。

中断方式是 CPU 的一种处理外界实时信息的功能。CPU 在正常运行程序时，允许由外部电路随时迫使 CPU 暂停当前运行程序而转向另一个称为中断服务程序的程序段。该程序段往往是为外围通道服务的。当执行完中断服务程序后，再继续运行被中断的程序。

有了中断系统之后，可以克服前面提到的握手方式和查询方式的缺点，特别是直接面向生产过程的外围通道，由于生产系统的特点，决定着外围通道工作速度可以不必很高，这就更有必要用中断控制方式来协调快速 CPU 与慢速外围通道之间的关系。CPU 启动外围通道工作之后就自己固有规律工作，当外围通道完成任务之后，向 CPU 发出中断请求，要求 CPU 暂停自己的工作，转去为外围通道服务。这样就可以实现 CPU 使用外围通道而不等待外围通道。这种中断工作方式的流程图如图 2-7 所示。