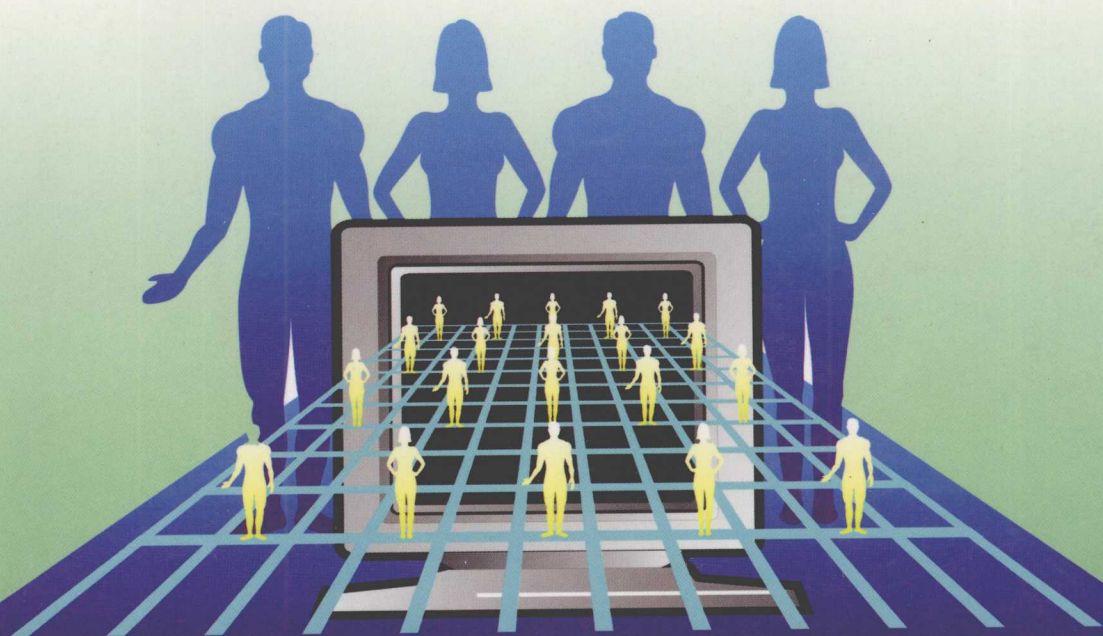




主编 赵国材

计算机控制技术

吉林人民出版社

计算机控制技术

主编 赵国材

江苏工业学院图书馆
藏书章

吉林人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制技术/赵国材主编. —长春:吉林人民出版社, 2001. 6

ISBN 7-206-03697-X

I. 计… II. 赵… III. 计算机控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 028578 号

计算机控制技术

主 编: 赵国材

责任编辑: 郭美英

封面设计: 小 亚

吉林人民出版社出版 发行

(中国·长春市人民大街 7548 号 邮政编码: 130022)

印 刷: 北京市朝教印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 300 千字

标准书号: ISBN 7-206-03697-X/F·841

版 次: 2005 年 7 月第 2 版

印 次: 2005 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1000 册

定 价: 35.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

前 言

本书是作者在辽宁工程技术大学电气工程系多年从事计算机控制的教学和科研的基础上,将有关教学和科研成果加以总结提高,并吸收了近几年来国内外本学科发展的先进理论、方法和新技术,从实际出发,立足理论联系实际和面向二十一世纪人才培养的目标,在多次讲授、反复修改提高的基础上编写的。

本教材针对计算机控制系统中所涉及的基础知识以及应用技术等做了较为全面和系统的论述。全书共七章,第一章阐述了计算机控制系统的基本概念。第二章介绍计算机控制系统的分析数学知识,如Z变换、差分方程等内容。第三章介绍计算机控制系统的数学描述方法。第四章介绍数字控制器的设计方法,如最少拍有无纹波控制系统的设计及大林算法等内容。第五章数字控制器的状态变量设计方法。第六章介绍计算机控制系统的过程输入输出通道设计。其中包括模拟量和数字量的输入输出通道设计。以及干扰和干扰的抑制方法。第七章计算机控制系统的应用实例,是在各章的基础上通过实际例子,使读者更好地掌握计算机控制系统的设计过程。

本书在编写时,力求做到理论分析计算与应用技术并重。概念准确,数据精确,文字叙述简明扼要,文图配合适当。在介绍计算机控制系统时,注重软件与硬件有机结合,目的使读者能牢固地建立起计算机控制系统的概念。为了便于读者自学,教材中配有一定数量的习题并列举大量实例。在编写过程中作者还注意解决工程实际问题,其中包括作者多年来从事计算机控制系统方面的科研课题时所得到的体会和经验,并根据计算机发展的最新情况,有重点地引入一些新的概念和方法。特别是对计算机控制系统的硬件组成等一些内容,以当前最流行的系统结构和相关的新技术作为本书的重点加以介绍。

本书作为高等院校电气类、电子类以及机电一体化等专业的本科生教材,也可作为从事微机应用工作的工程技术人员的参考书。

本书由辽宁工程技术大学赵国材主编。参加本书编写工作的有:赵国材(第一、二、三、四、五、六章),辽宁工程技术大学朴忠学(七章)。吉林大学博士生导师戴逸松教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。在编写过程中辽宁工程技术大学电气工程系孟庆春教授、李晓竹教授以及同事们都给予了大力帮助,在此表示诚挚的感谢。

限于水平,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

赵国材 于辽宁工程技术大学
2001年1月

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 计算机控制系统概述 (1)
- 1.2 计算机控制系统的构成 (2)
- 1.3 计算机控制系统的分类及其功能特点 (4)

第二章 离散系统分析数学基础

- 2.1 采样信号与采样定理 (7)
- 2.2 采样信号的恢复 (11)
- 2.3 采样信号的 Z 变换 (14)
- 2.4 Z 变换的基本定理 (18)
- 2.5 Z 反变换 (21)
- 2.6 用 Z 变换解线性差分方程 (24)

第三章 计算机控制系统的数学描述和分析方法

- 3.1 脉冲传递函数 (30)
- 3.2 闭环系统的脉冲传递函数 (33)
- 3.3 采样系统的动态分析 (37)
- 3.4 离散系统稳定性及稳定条件 (40)
- 3.5 计算机控制系统的稳态误差 (44)

第四章 数字控制器的设计方法

- 4.1 概 述 (51)
- 4.2 数字 PID 控制基本算法 (51)
- 4.3 数字 PID 算法积分项的改进 (55)
- 4.4 PID 控制的微分项的改进 (57)
- 4.5 数字 PID 控制器参数的整定 (60)
- 4.6 最少拍数字控制系统的设计 (64)
- 4.7 最少拍设计中典型输入对 $\Phi_e(Z)$ 的限制 (68)
- 4.8 最少拍设计对 $M(Z)$ 和 $\Phi_e(Z)$ 的约束——原则 (72)
- 4.9 最少拍无纹波系统设计 (77)

第五章 状态空间分析及数字控制器的设计

- 5.1 状态空间与状态方程 (85)
- 5.2 线性定常离散系统的状态方程描述 (87)
- 5.3 离散系统状态方程的解 (92)

5.4	离散系统状态方程与脉冲传递函数	(97)
5.5	能控性与能观测性	(100)
5.6	坐标变换与标准型	(105)
5.7	状态反馈极点配置控制系统的设计	(110)
5.8	状态观测器的设计	(119)
5.9	具有状态观测器的极点配置	(124)
第六章 过程输入输出通道		
6.1	过程输入输出通道的控制方式	(131)
6.2	模拟量输入通道	(133)
6.3	数/模转换及模拟转换技术	(145)
6.4	集成 A/D 转换器及与 CPU 的接口	(154)
6.5	模拟量输出通道	(167)
6.6	开关量(数字量)输入通道	(178)
6.7	开关量输出通道	(185)
6.8	过程通道的抗干扰措施	(188)
第七章 计算机控制系统设计举例		
7.1	微型计算机控制系统设计的基本要求	(197)
7.2	微型计算机控制系统设计的一般步骤	(197)
7.3	微机控制系统设计举例	(200)
7.4	橡胶硫化单片机控制系统	(205)

第一章 绪 论

1.1 计算机控制系统概述

随着计算机应用的日益普及,计算机在控制工程领域中也发挥着越来越重要的作用。计算机控制技术是计算机技术与自动化技术相结合的应用技术,是计算机几大应用领域之一。

利用计算机代替常规的模拟控制器,并使它成为控制系统的一个组成部分,对于这种有计算机参加控制的系统简称为计算机控制系统。计算机控制系统有时也称为数字控制系统,这是因为控制系统中包含有数字信号的原故。

1. 计算机的开环控制与闭环控制

从控制理论可知,如图 1-1 所示的系统,其控制器的输出只随给定值而变,与被控对象的被控参数变化无关,这样的系统称为开环控制系统,如果需要调整被控参数,可人为调整给定值,改变控制器的输出,通过执行器动作位置的变化,以达到改变被控参数的目的。

但是在实际的生产过程中,往往因各种外界因素的干扰,使被控参数偏离给定值(如电动机转轴转速随轴负荷的变化而变化,加热炉炉门的开闭和进出料影响炉温的变化),又不能自动得到恢复,所以它的控制性能是比较差的。

图 1-2 所示系统,是将被控参数与给定值进行比较,然后形成误差信号,控制器的输出信号的大小产生一相应的控制信号,自动调整系统的输出,使其误差趋向于零,这样就形成所谓闭环负反馈控制系统。

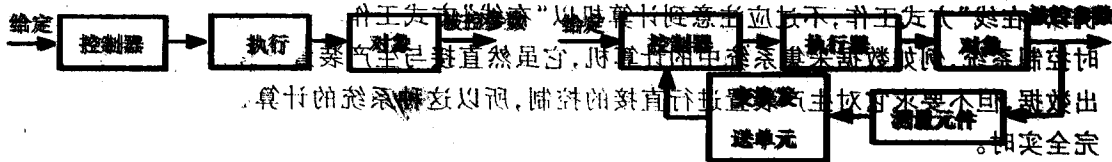


图 1.1 开环控制系统

图 1.2 闭环控制系统

1.1.1 计算机控制系统的组成

在常规的控制系统中,上述的控制器是用自动化仪表或其他控制装置来实现的。如果控制器的计算机来代替,便构成了计算机控制系统。计算机控制系统由下列几部分组成。

在计算机控制系统中,计算机的输入输出的物理量都是数字量,被控对象的输入输出信号往往都是连续变化的模拟量,为此在计算机的信号输入输出端需要设置输入输出转换器。典型的计算机控制系统框图如图 1-3 所示。

图 1-3 计算机控制系统框图如图 1-3 所示。图中显示了计算机与外部设备的接口,包括输入输出接口、数据接口、地址接口等。

图 1.1

主机包括微型机、存储器、操作台和实时时钟。微机的选用,可根据系统的复杂程度,功能的强弱和对速度的要求。主机是整个系统的核心部分,它主要是执行人们预先编制好并存放在存储器的程序,收集从工业生产过程送来的过程参数,并进行处理,分析判断和运算,得到相应的控制信息,将它输出到工业生产过程,使过程参数趋于预定数值。

2. 过程通道

过程通道是主机与工业生产过程交换的通道,是计算控制系统按特殊要求设置的部分。按传送信号的形式可分为模拟量通道和开关量通道,按信号传送的方向可分为输入和输出通道。

由于生产过程的被控参数一般为连续变化的非电物理量,所以在模拟量输入通道中,先用传感器把它转换成连续变化的模拟量,然后用 A/D 转换器转换成计算机能够接受的数字量;计算机输出的数字量往往要经过数模转换器 D/A 转换成连续的模拟量,去控制可连续动作的执行机构。此外,还有开关量形式的信号,它将通过开关量输入输出通道来传送。因此过程通道有:模拟量输入/出通道,开关量输入/出通道。

3. 接口

接口是通道与微机之间的中介部分,经接口联接,使用它可达到由微机从多个通道中选择特定通道的目的。

系统所用的接口通常是通用的数字接口,其中分为并行接口、串行接口和脉冲列接口。目前各种型号的 CPU 均有其配套的通用可编程接口芯片,这些接口芯片使用方便灵活。例如 TTL 电路,8255 等,为了能用好各种接口,我们要充分了解和掌握更多的通用集成接口芯片。

4. 控制操作台

控制操作台是人与计算机控制系统联系的必要设备,在操作台上随时显示或记录系统的当前运行状态和被控对象的参数,当系统某个局部出现意外或故障时,也在操作台上产生报警信息。操作人员在操作台上可修改程序或某些参数,也可按需要改变运行状态。

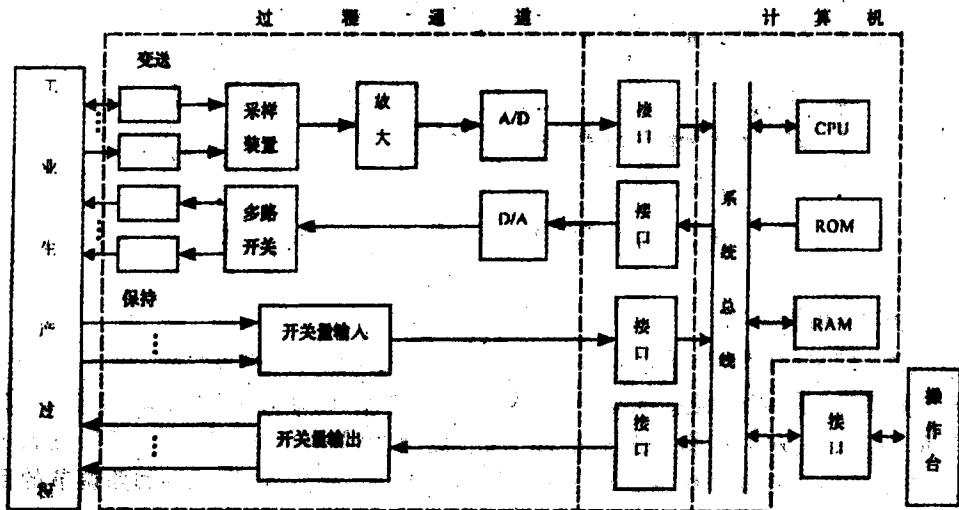


图 1.4 计算机控制系统结构图

二、计算机控制系统的软件组成

计算机控制系统的运行,是在软件的操作下协调运行以执行预定的测量或控制任务。

计算机软件分系统软件和应用软件两大类,系统软件是计算机运行的基本条件之一,由于硬件发展很快及应用领域的扩大,系统软件发展也很迅速。系统软件主要包括:监控程序或操作系统;汇编程序、解释程序和编译程序。计算机实时控制系统的应用软件是服务于实时控制的程序的集合。应用软件是按照对系统功能要求和完成任务的不同而有所不同,通常由用户来编写,其编写的质量好与坏直接影响控制系统的控制效果。

1.3 计算机控制系统的分类及其功能特点

根据计算机的应用特点和参与控制的方法,计算机控制系统可划分为四类:

一、数据采集和数据处理系统

采集和数据处理系统从功能上说,主要是对生产现场随时产生的大量数据(如温度、压力、流量、成分、速度、位移量等)进行巡回检测、收集、记录、统计、运算、分析、判断等处理。最后由显示器或打印机输出结果,供操作人员掌握和分析生产情况,如遇到某个参数越限,操作人员可及时处理,但它并不直接控制生产过程。

数据采集和数据处理硬件组成原理框图如图 1.5 所示。按这类系统功能的要求,硬件系统中主机与生产过程只通过模拟量输入通道和开关量输入通道来联系,一般不需要输出过程通道。在软件方面,它除了有控制数据输入的程序外,还要有与功能要求相适应的数据处理程序。

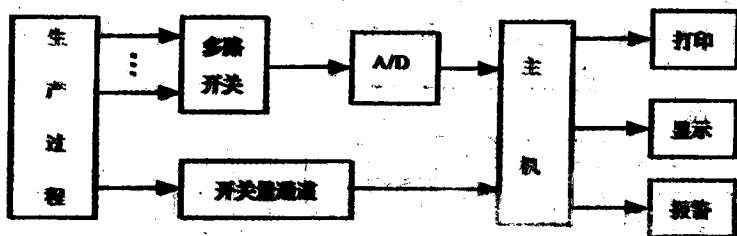


图 1.5 数据采集和数据处理系统硬件组成框图

二、直接数字控制系统

直接数字控制 DDC (Direct Digital Control) 系统是工业生产计算机控制系统中用得最广泛的一种系统应用形式。这类系统中的计算机除了经过输入通道对多个工业过程参数进行巡回检测采集外,它还取代模拟调节系统中的模拟调节器,按预定的调节规则进行调节运算,然后将运算结果通过过程输出通道输出并作用于执行机构,以实现多回路调节的目的。

直接数字控制系统的硬件组成原理框图如图 1.6 所示。系统中除了输入/出过程通道外,一般还有一个功能较强的控制操作台,在操作台可调整被控参数的给定值、显示或打印采样值、声光报警装置也在操作台上。

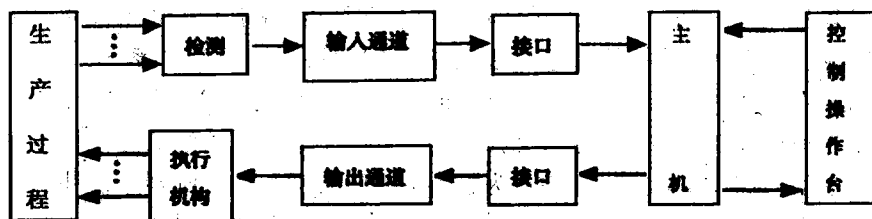


图 1.6 直接数字控制系统硬件组成框图

直接数字控制系统可实现常规的 PID 调节,也可实现复杂或先进的调节规律,调节规律的改变只需要变换控制软件。不同的是硬件部分除按需适当增减通道的数量外,一般不需作大的变动,所以使用比较灵活。显然 DDC 系统是一个“在线”的实时闭环控制系统。

三、监督控制系统

监督控制系统 SCC (Supervisory Computer Control) 的硬件组成原理框图如图 1.7 所示。在这类系统中,生产过程的闭环自动调节是依靠模拟调节器(图 1.7(a))或 DDC 计算(图 1.7(b))来完成,SCC 计算机的输出作为模拟调节器或 DDC 系统的设定值,这一设定值将根据采集到的生产过程信息,按照预定的数学模型或用其他方法所确定的规律进行自动修改,使生产过程始终在最优的工况下运行。

模拟调节器或 DDC 计算机直接面向生产过程,SCC 计算机是面向模拟调节器或 DDC 计算机,也就是说,含有 SCC 的系统至少是一个两级控制系统。一台 SCC 计算机可监督控制多台 DDC 或模拟调节器,这种系统具有较高的运行性能和可靠性。

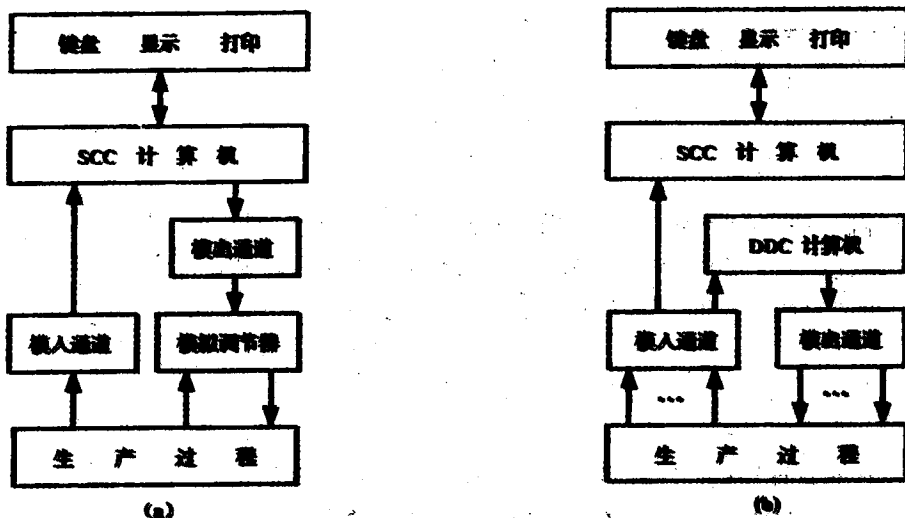


图 1.7 监督控制系统硬件组成框图

四、集散控制系统

随着计算机控制系统应用的发展,到了 70 年代中期出现了一种称为综合分散型控制系统 TDC (Total - Distributed Control system),也称分级分布式控制系统,简称集散系统,它是计算机、控制器、通讯和显示器技术相结合的产物,多台以微处理器为核心的控制器分散于

整个生产过程各部分,整个系统采用单元模块组合式结构,各单元用通讯线路连接成一个整体,不同的系统可用不同的模块来组合以适应不同的要求。但整个系统一般总是由实现 DDC 局部控制的基本控制器,实现监督控制的上级监督控制计算机及控制操作台等组成。可使整条生产线或整个车间达到全自动控制的目的。集散控制系统的组成框图如图 1.8 所示。图 1.8 中的局部控制均以微处理器为核心的 DDC 控制,各控制器通过外部数据通讯线路与上级 SCC 计算机及控制操作台联系,控制操作台也是以微处理器为核心的装置。系统应用的层数可按需确定,目前较普遍地采用第一、第二两层组成的系统。

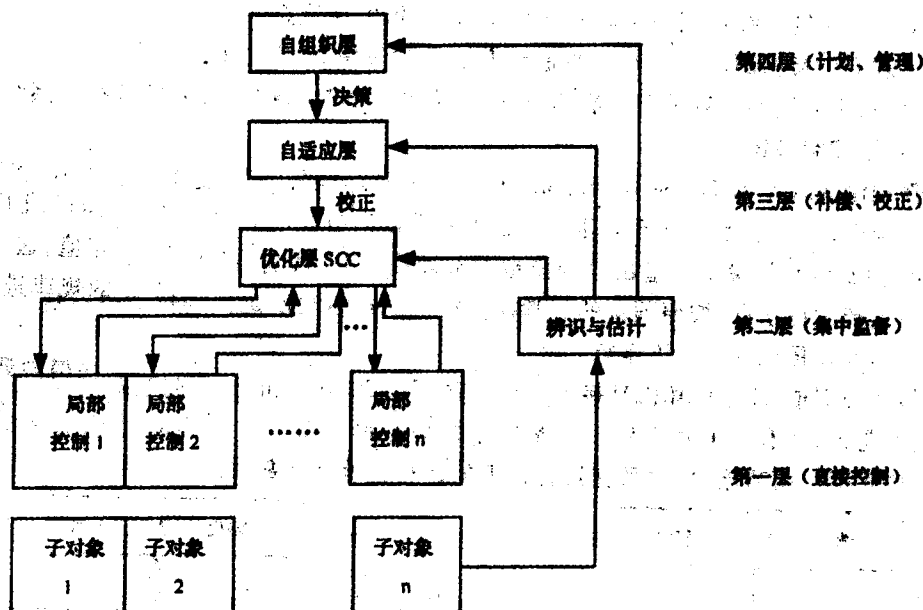


图 1.8 集散控制系统组成框图

集散控制系统有系统组成灵活,操作方便,能实现集中控制和可靠性高等优点。目前许多国家都陆续推出了类似的产品,我国也在通过引进与自行研制相结合的方式,开展集散控制系统的生产和推广工作,不久的将来,集散控制系统的广泛应用在我国必定遍地开花。

习 题

1. 什么是计算机控制的实时性?为什么要强调它的实时性?实时与同时有何区别?
2. 计算机在控制系统中“在线”操作与“离线”操作的区别是什么?
3. 计算机控制系统的硬件一般由哪几部分组成?各部分是怎样互相联系的?其中过程通道在系统中起着什么作用?有几种基本类型?
4. 数据采集、数据处理系统的基本功能是什么?它属于开环系统吗?
5. 直接数字控制系统的硬件由哪几部分组成?它的基本功能是什么?它的软件承担什么任务,它的监督控制系统的根本区别在哪里?

第二章 离散系统分析数学基础

在工业控制中常常会遇到工作于连续状态下的被控对象,因此,在进行系统分析系统综合时,通常将计算机和被控对象一起进行离散化处理。所以掌握离散系统的基本理论和基本分析方法是十分重要的。

2.1 采样信号与采样定理

一、采样信号和采样过程的数学描述

图 2-1 给出了一个简单的控制系统原理图。在计算机控制系统中,计算机所处理的是数字信号,而被控对象是常处于连续工作状态,因此,系统的输出是连续信号,假定给定值也是连续的,那么得到的偏差量也定是连续信号。为了使计算机能运算和处理,需要将连续信号转换成数字信号,首先对连续的偏差信号 $e(t)$ 进行采样,得到离散模拟信号,然后通过 A/D 把离散模拟信号变成数字信号送给计算机,如图所示。

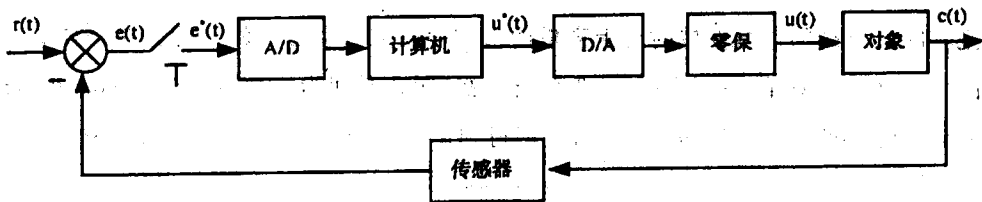


图 2-1 计算机控制系统

连续信号是定义在整个连续时间范围内,并且其幅值在某一区间内也呈现连续值的信号。视是否将连续信号在时间和幅值上离散化,可以得到以下四种信号,如图 2-2 所示。(a)连续时间信号;(b)连续时间整量化信号(随时间连续变化,幅值取离散值);(c)采样信号(仅在离散时间取值,幅值为连续变化);(d)数字信号(仅在离散时间取值,幅值取离散值)。

与连续信号不同,图 2-2(b)所表示的模拟信号只能按一组断续的阶跃值变化。换句话说,它只能取一组离散的数值。这一将幅值可以连续取值的信号变成幅值只能取离散值的过程称为整量化。

图 2-2(c)所示的采样信号,也称为离散信号,它仅仅定义在各个离散的瞬时上。离散信号是对连续时间信号在各个离散的瞬时上采样而产生的。

2-2(d)所示的数字信号与离散信号不同之处在于它不仅只定义在各个离散的瞬时上,并且幅值只能取离散值。换句话说,它是量化了的离散信号。这种信号可由一系列数字表示。

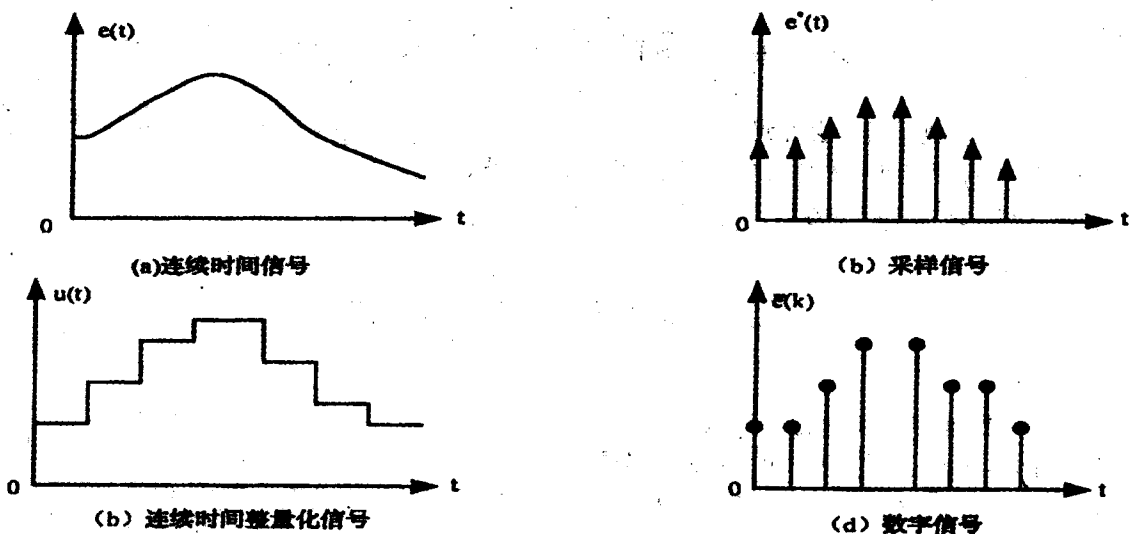


图 2-2 信号类型

把时间上连续的信号变成时间上离散的采样信号或数字信号的过程称为采样。采样过程如图 2-3 所示, 采样开关每隔时间 T 闭合一次, 闭合时间为 τ , 对连续信号 $e(t)$ 进行采样, 将它变成时间上离散的采样信号 $e^*(t)$ 。即得到一个序列 $\{e(0), e(T), e(2T), \dots\}$ 。

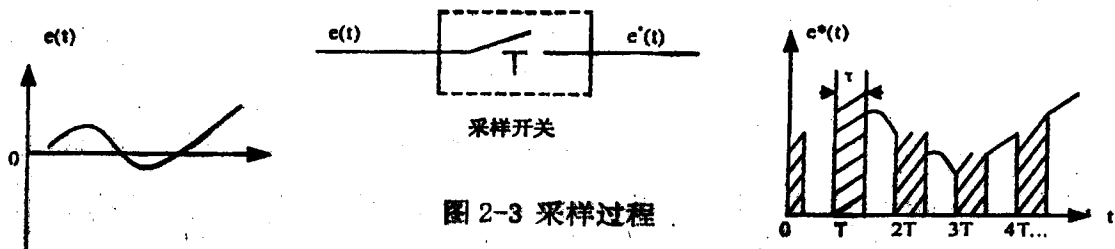


图 2-3 采样过程

T 称之为采样周期。采样开关闭合时间 τ 通常非常短, 特别是在实际应用中, 采样开关均为电子开关, 这时有 $\tau \ll T$ 。因此, 在理想情况下, 可以假设 $\tau = 0$, 此时的采样开关为理想采样开关。通过理想采样开关采样后的信号 $e^*(t)$ 就成为一系列有高度无宽度脉冲序列如图 2-4 所示。

采用 δ 函数来描述采样过程。 δ 函数是一广义函数又称为脉冲函数, 若 $e(t)$ 为连续函数, 对 δ 函数有:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e(t) \delta(t - kT) dt = e(kT), k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

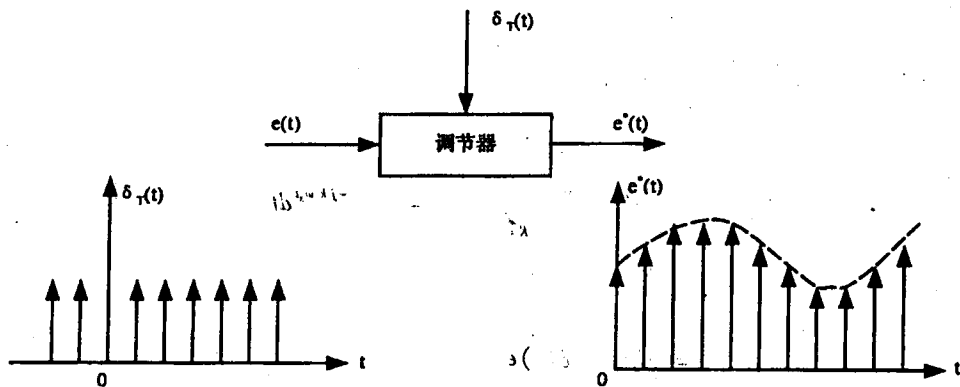


图 2-4 理想采样开关采样后所得的采样脉冲序列

由式(2-1)知, δ 函数具有采样性质。因此, 理想采样开关闭合一次, 相当于在该时刻作用一个单位脉冲函数。采样开关以 T 为周期闭合, 相当于一系列单位脉冲函数的作用。构造单位脉冲序列。

$$\delta_T(t) = \cdots + \delta(t+kT) + \cdots + \delta(t+T) + \delta(t) + \delta(t-T) + \cdots + \delta(t-kT) + \cdots$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-kT) \quad (2.2)$$

则 $e^*(t)$ 可以看成是 $\delta_T(t)$ 被连续信号 $e(t)$ 调幅的结果。即采样过程可以看成是一个脉冲调制过程, 输入量 $e(t)$ 作为调制信号, 而 $\delta_T(t)$ 作为载波。因此, 采样函数 $e^*(t)$ 可表示为

$$e^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e(kT) \delta(t-kT) \quad (2.3)$$

根据 δ 函数的性质, 式(2.3)还可以写成

$$e^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e(kT) \delta(t-kT) \quad (2.4)$$

在式(2.4)中 $e^*(t)$ 由一系列脉冲构成, 表达式中, $\delta(t-kT)$ 仅表示采样发生的时刻, 并无其他物理意义, 而 $e(kT)$ 则表示在 kT 采样时刻所得到的离散信号值。

由于 $\delta_T(t)$ 是一周期函数, 可以将其展开成傅里叶级数

$$\delta_r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_s t} \quad (2.5)$$

其中 $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ 为采样角频率, 系数

$$\begin{aligned} c_k &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \delta(t - Kt) e^{-jk\omega_s t} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \delta(t) e^{-jk\omega_s t} dt \\ &= \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (2.6)$$

因此有
$$\delta_r(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{jk\omega_s t} \quad (2.7)$$

代入式(2.3)可得

$$e^*(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2.8)$$

另外, 若所讨论的函数 $e(t)$ 在 $t < 0$ 时等于零, 则式(2.3)和式(2.4)还可写成

$$e^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e(t) \delta(t - kT) \quad (2.9)$$

和

$$e^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e(kT) \delta(t - kT) \quad (2.10)$$

式(2.8)至式(2.10)三个等式均是关于采样信号 $e^*(t)$ 的等效数学描述。三种描述彼此之间都是等价的。

二、采样定理

采样信号只给出了采样时刻的数值 $e(0), e(T), e(2T), \dots$ 。对连续信号来说, 它在任何时刻的数值都是确切知道的, 但是采样后, 除了能掌握 $e(t)$ 在采样时刻的数值 $e(kT)$ 以外, 在采样间隔内的状况就不知道了。所以, 从时域的角度来看, 采样过程丢失了信号在采样间

隔内的信息。显然采样周期 T 越大, 信号变化越快, 则信息丢失越严重, 也就更难从采样信号中了解原信号的状况。当采样频率 $\omega_s \geq 2\omega_{\max}$ 时, 采样信号可大体上反映原来信号的面貌。这就是 (shannon) 或称采样定理。

应该指出, 香农定理只给出了实现采样信号完全恢复模拟信号的最小频率 $\omega_s \geq 2\omega_{\max}$ 。由于所有的信号并非都是“有限带宽”, 所以在实际应用中, 往往取的实际采样频率 ω_s 比 $2\omega_{\max}$ 大, 一般至少取 $4\omega_s$ 。

2.2 采样信号的恢复

在连续信号 $e(t)$ 经过采样之后即可得到采样信号 $e^*(t)$, 它在时间上是断续的是离散的。在工程上, 还有另一种信号变换, 即由采样信号 $e^*(t)$ 不失真地恢复原连续信号 $e(t)$ 。这一过程称为采样信号的恢复。首先, 从频谱分析入手对式 (2.8) 两边取拉氏变换, 并利用拉氏变换的位移定理, 可得

$$E^*(S) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} E(S + jk\omega_s) \quad (2.11)$$

通常 $E^*(s)$ 的全部极点均在 $[s]$ 平面的左半平面上, 故可用 $s = j\omega$ 代入上式

$$E^*(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E(j\omega + jn\omega_s) \quad (2.12)$$

其中, $E(j\omega)$ 为 $e(t)$ 的频谱, 它是连续的频谱, 而 $E^*(j\omega)$ 是 $e^*(t)$ 的频谱, 它是离散的频谱。式 (2.12) 表示, $e(t)$ 经采样后得到的采样信号 $e^*(t)$ 的频谱 $E^*(j\omega)$ 与 $e(t)$ 的频谱 $E(j\omega)$ 相比, 是 $E^*(j\omega)$ 在高频部分重现 $E(j\omega)$ 。设 $E(j\omega)$ 具有如图 2-5(a) 所示的频谱, 其中 $\omega_{\max}$ 为 $e(t)$ 信号有效频谱的最高频率, 则视 ω_s 与 $\omega_{\max}$ 之间的关系不同, $E^*(j\omega)$ 具有图 2-5(b)、(c) 及 (d) 所示的频谱。

从图 2-5(b)、(c) 中可看出, 当 $\omega_s \geq 2\omega_{\max}$ 时, $E^*(j\omega)$ 的频谱与 $E(j\omega)$ 相比, 只是在高