

蒋静坪编著
浙江大学出版社

计算机

实时控制系统



责任编辑：龚建勋 封面设计：冯社宁

计算机实时控制系统

ISBN7-308-00741-3/TP·052 定价：6.85 元



计算机实时控制系统

蒋静坪 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字第10号

内容简介

本书是计算机实时控制的基本教材,着重介绍计算机实时控制的基本理论和基本技术,尤其注重设计方法。主要内容有:计算机实时控制系统概述;计算机接口及其编程方法;离散控制系统的描述与分析;计算机实时控制系统的设计,如PID控制器,最少拍控制器,极点配置与状态观测器等的设计;系统辨识与参数估计;状态估计与最优线性调节器;离散最优控制系统;自适应控制等。

本书是经过多年教学实践后写成的,各章节都有典型的实例,容易理解、掌握,并有经过实验的应用程序列入附录,可供参考应用。

本书在选材中,注意先进性和实用性。本书可作为高等学校自动化类专业的研究生或高年级大学生教材或参考书,也可供从事计算机实时控制的工程技术人员、科技工作者以及教师参考。

计算机实时控制系统

蒋静坪 编著

* * *

浙江大学出版社出版

德清第二印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

开本787×1092 1/16 25.375印张 633千字

1992年4月第1版 1992年4月第1次印刷

印数: 0001—2050

ISBN 7—308—00741—3

TP·052 定价: 6.85元

前 言

随着计算机技术的迅速发展，特别是小型计算机和微型计算机的功能不断完善，性能不断提高，价格不断下降，各类自动控制系统中越来越广泛地应用计算机进行实时控制。在提高劳动生产率，降低成本，节约能源，提高产品质量和改善劳动条件等方面，取得了显著的效益。因此，社会上迫切需要提供有关计算机控制的理论和技术。本书的编著目的有两个：其一，向正在学校学习的学生和准备从事计算机控制的工程技术人员，介绍计算机实时控制的有关理论、设计和分析方法；其二，在大力推广和普及计算机控制技术中，希望能在提高应用水平，争取实际效益上有所贡献。

本书主要介绍计算机控制系统的基本理论和基本技术，注重理论联系实际。本书除了系统地讨论有关理论外，特别重视控制策略的算法化、控制算法的程序化，并通过实例，介绍计算机控制系统的构成、设计和实现的有关技术问题。

本书共分八章。第一章介绍计算机实时控制系统的基本概念和基本问题。第二章讨论常用计算机的常用接口电路，着重介绍各种接口的程序编写技术。第三章介绍计算机控制系统的差分方程，脉冲传递函数和状态方程的表达方法以及它们之间的互相转换原理，讨论计算机控制系统的稳定性分析方法等。第四章概括地介绍计算机控制系统的常规设计方法，包括数字控制器和极点配置的设计方法。第五章讨论计算机控制系统的参数估计，介绍了“Householder”变换算法及最小二乘递推算法等。第六章介绍了状态估计，主要讨论了最小方差估计和卡尔曼滤波估计。第七章介绍离散系统的最优控制技术。第八章讨论自适应控制技术。

本书是在浙江大学电机系硕士研究生的计算机实时控制课程使用多次的讲义基础上编写而成的。内容由浅入深，各章节有典型实例，容易掌握。选材上注意先进性、系统性和实用性。

本书可作为高等学校自动化类专业的研究生或高年级大学生的教材，也可供从事计算机控制的工程技术人员参考。

由于编著者水平有限，如有错误或不妥之处，欢迎读者批评指正。

蒋静坪

写于浙江大学

1991年

6A1128/06

目 录

第一章 计算机实时控制系统概述	1
§1-1 计算机实时控制系统	1
§1-2 计算机实时控制的几个特殊问题	5
§1-3 计算机控制技术的发展趋势	10
习题	12
第二章 计算机接口及其编程方法	13
§2-1 模拟/数字变换器(A/D变换器)	13
§2-2 数字/模拟变换器(D/A变换器)	25
§2-3 DT1401 模拟/数字、数字/模拟变换器和并行输入/输出端口	27
§2-4 KVV11-C可编程实时时钟	33
§2-5 实时时钟程序编写举例	37
§2-6 终端键盘的程序编写	39
§2-7 终端CRT的程序编写	41
§2-8 终端键盘和CRT程序编写举例	42
§2-9 DRV 11-C 并行输入/输出接口	42
§2-10 DRV11-C并行输入/输出接口的程序编写举例	45
§2-11 串行输入/输出接口	49
习题	54
第三章 离散控制系统的描述与分析	55
§3-1 离散控制系统的脉冲传递函数表达式	55
§3-2 离散控制系统的差分方程表达式	74
§3-3 离散控制系统的状态方程表达式	77
§3-4 连续状态方程的离散化	88
§3-5 离散状态方程的求解	91
§3-6 脉冲传递函数矩阵	98
§3-7 离散控制系统的稳定性分析	103
§3-8 离散控制系统的可控性	117
§3-9 离散控制系统的可观性	120
习题	121
第四章 计算机实时控制系统的设计	124
§4-1 数字PID控制器的算法与程序	125

§4-2 最少拍数字控制器的算法与程序	136
§4-3 计算机控制系统的极点配置设计方法	148
§4-4 计算机控制系统的状态观测器	169
§4-5 伺服控制系统的极点配置设计方法	194
附录	203
习题	217
第五章 动态系统的计算机实时辨识与参数估计	220
§5-1 动态系统辨识	220
§5-2 最小二乘估计	221
§5-3 “Householder” 正交变换算法	222
§5-4 连续搅拌反应釜 (CSTR) 的浓度估计	232
§5-5 递推最小二乘估计	236
§5-6 具有遗忘因子的递推最小二乘估计	240
§5-7 增广最小二乘估计	242
§5-8 广义最小二乘估计	243
§5-9 多变量系统的最小二乘估计	245
习题	250
第六章 动态系统的状态估计与最优线性调节器	252
§6-1 线性最小方差估计	252
§6-2 最小方差估计	254
§6-3 系统状态的递推估计——卡尔曼滤波器	255
§6-4 扩展卡尔曼滤波估计	263
§6-5 线性随机系统的最优反馈控制器	265
§6-6 线性随机最优反馈控制系统的实验研究	269
附录	275
习题	278
第七章 离散最优控制系统	280
§7-1 二次型最优控制	280
§7-2 稳态二次型最优控制	293
§7-3 伺服系统的二次型最优控制	305
附录	311
习题	316
第八章 自适应控制系统	319
§8-1 模型参考自适应系统的基本概念	319
§8-2 模型参考自适应控制系统的设计方法	325

§8-3 自校正调节器.....	344
附录.....	364
习题.....	366
附录.....	367
参考文献.....	396

第一章 计算机实时控制系统概述

§ 1-1 计算机实时控制系统

随着计算机技术的迅猛发展,计算机在自动控制中的应用也越来越广泛。计算机实时控制的目的是实现生产过程优化、节约能源、提高产品的产量和质量,降低劳动强度和提高自动化水平。因此这一新兴技术与国民经济的发展和科学技术的进步有着紧密的联系。

在自动控制系统中,计算机可以用作数据采集与处理,生产机械的程序控制和数值控制,生产过程优化与适应控制、大型企业的生产调度与管理等。

图1-1表示一个典型的计算机闭环实时控制系统方块图。

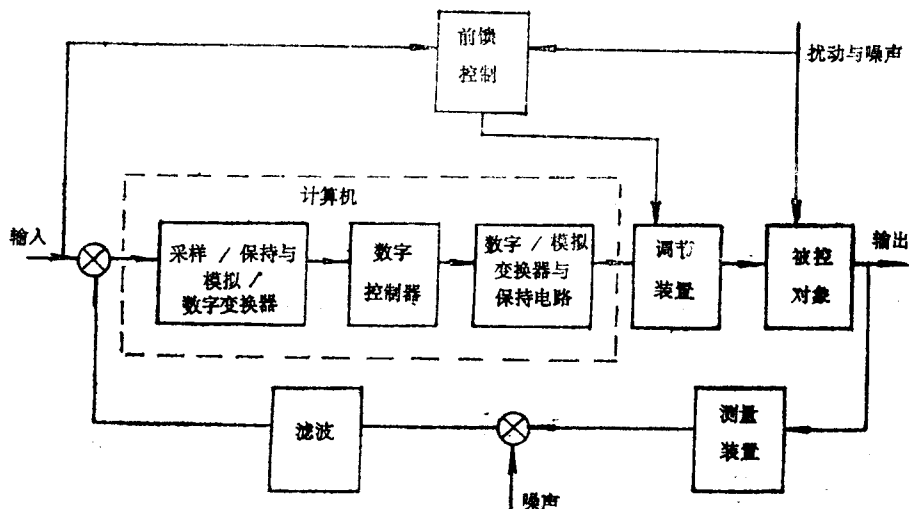


图1-1 计算机闭环实时控制系统方块图

控制系统包含前馈控制与反馈控制。控制系统的输入量与反馈量是连续信号,经采样保持电路和模拟数字(A/D)变换器,变换成为数字量,计算机根据控制需要的某一种控制算法,经过运算处理后,得到所需要的控制量,再经过数字模拟(D/A)变换器,变换成模拟信号,作为调节装置的输入量,这样就构成了一个闭环的计算机控制系统。

下面介绍几种常见的计算机控制系统。

一、数据采集系统

计算机用作各种数据的采集,通常是在主计算机的管理下,定期采集生产系统的各种参数。需要时可对采集的数据进行图表显示、打印制表、在线画面表示等,提供生产操作。

当主计算机需要处理这批数据时，数据采集装置通过各种方式快速地将数据传送给主计算机。

对于一个实时控制系统，数据采集必须考虑它的响应速度，要保证采集到的物理量，计算机作出实时对策，从而进行实时控制等，都能及时地进行。

二、计算机数字控制系统

计算机数字控制系统是一种直接数字控制系统。所谓直接数字控制是对生产对象发生直接控制作用，计算机作为生产对象的数字控制器。计算机数字控制系统，广泛地应用在数控机床中。

图1-2表示了一个典型的机床数字控制系统。

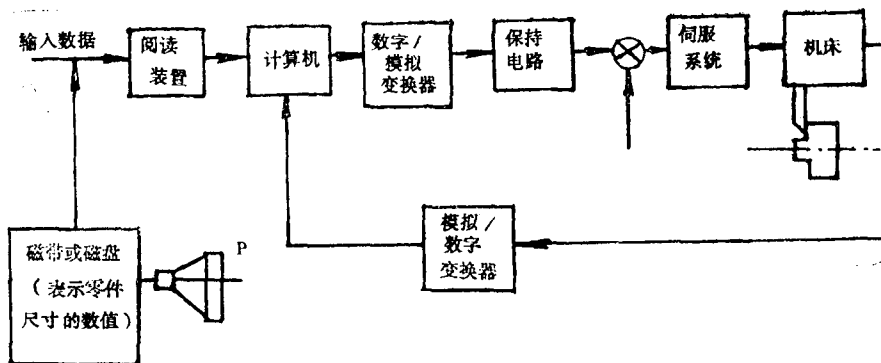


图1-2 机床数字控制系统方块图

磁带或磁盘中表示要加工零件P的尺寸的二进制数值，系统开始工作时，首先将磁带或磁盘中的数值传送给阅读装置，阅读机将二进制数值变换成输入脉冲信号，经计算机各种插补运算并与反馈脉冲信号进行比较，得到偏差脉冲信号。所谓插补运算就是根据零件的原始数据，通过计算机获得一定比例的脉冲列，实现轨迹控制，即控制坐标点运动，使坐标点的合成运动轨迹符合零件的轮廓要求。计算机的输出值经数字模拟变换器和保持电路后，变换成模拟量，作为伺服马达系统的输入量。此外，计算机还输出各种顺序控制信号，控制机床的各种操作。

图1-3表示机床数控装置轨迹控制示意图。

根据要加工零件的轨迹，计算机输出一系列控制脉冲，供给x和y方向的伺服马达。图1-3中表示了为达到图中所示的运动轨迹，x和y方向脉冲分配的状况，通常每一个脉冲使机床刀架移动 1μ 的位移量，因此这种控制方式能达到很高的精度。

三、生产过程计算机控制系统

生产过程计算机控制也是一种直接数字控制系统。图1-4表示连续搅拌反应釜计算机实时控制示意图。

搅拌反应釜内的反应温度、浓度及压力是影响化学反应过程的主要因素，有效地控制反应过程的温度、浓度及压力，就可以得到满意的反应结果。反应釜内的温度是可以测量的状态，反应物的浓度是不可测量的状态，计算机控制的任务首先是采用扩展卡尔曼滤波器对系统的不可在线测量的状态变量——反应物浓度，进行实时状态估计，其次，在此基础

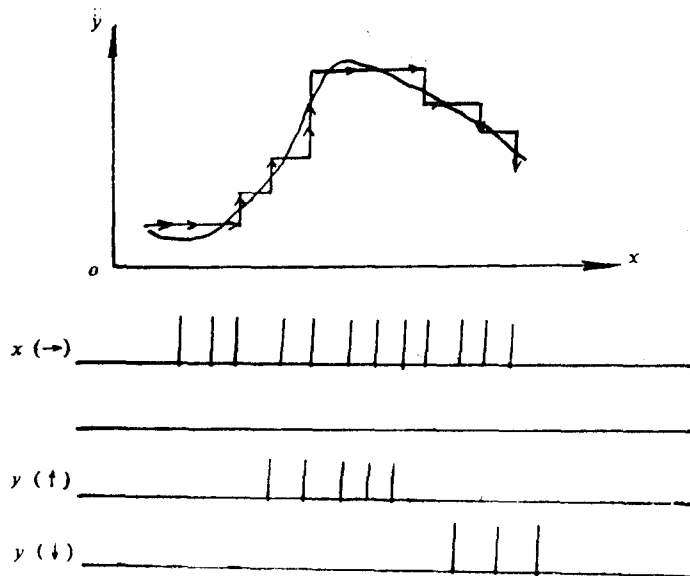


图1-3 机床数控轨迹的逼近解

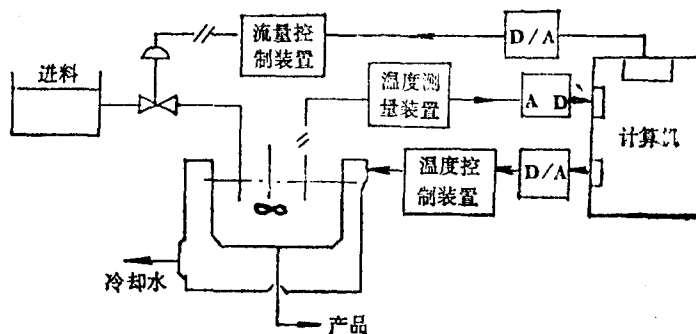


图1-4 连续搅拌反应釜计算机控制系统

上,针对连续搅拌反应釜的控制要求,设计各种控制策略,例如自适应控制,鲁棒控制等,实现实时闭环控制。有关连续搅拌反应釜的状态估计与自适应控制将在以后章节中再作介绍。

四、智能机器人控制系统

智能机器人的控制是属于一种复杂的计算机控制系统,机器人智能性的很重要的一个方面是取决于与控制 and 传感系统有关的计算算法。为了简单起见,仅讨论机器人手臂的控制,并着重说明一些控制策略。

机器人由于惯性,负载力矩是变化的,再加上各连杆之间的耦合以及非线性特性等,使得控制过程变成非常复杂。机器人的控制方法很多,例如常规的反馈控制、非线性反馈控制、变结构控制、最短时间控制和自适应控制等。图1-5表示机器人自适应控制的方块图。

这种控制方案,能在较宽的运动和负载变化范围内跟踪期望的轨迹,它是采用一种优化的控制规律来控制线性化的系统,前馈控制用来补偿各关节的相互耦合作用,反馈控制用来控制位置和速度偏差。此外,还用实时辨识算法来估计具有扰动的动态方程式中的系

统参数。

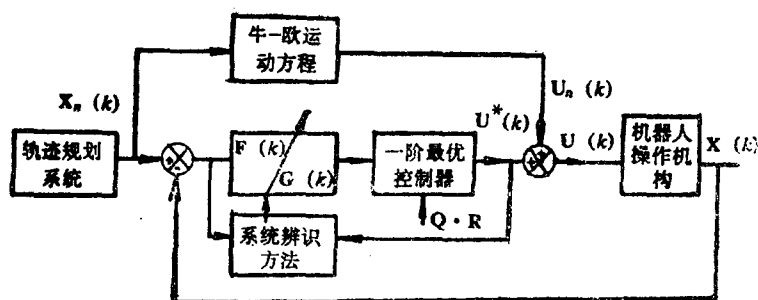


图1-5 机器人自适应控制方块图

在这一系统中，计算机需要完成以下的几项任务。

1. 采用合适的辨识算法，对状态矩阵 $F(k)$ 和输入矩阵 $G(k)$ 的参数进行实时估计。
2. 确定 $F(k)$ 和 $G(k)$ 中的参数后，计算机需要对设计好的控制算法进行计算，求得一个能使性能指标为最佳的最优控制信号 $u^*(k)$ 。
3. 计算机还需要计算前馈控制信号 $u_a(k)$ 。

由于计算工作量大，而机器人又要求能快速运动，所以在实时控制中，寻求快速的算法，采用快速执行的语言（必要时可用汇编语言）以及合理编制程序都是十分重要的。

五、计算机管理与控制集成系统

随着计算机技术的不断发展，目前的生产过程自动控制和企业生产管理都转到以计算机为中心的技术基础上。所谓计算机管理与控制集成系统，就是将生产过程计算机控制系统，通过直接控制，监督控制与生产过程优化、作业调度，逐级向上并与面向生产管理和经营管理的计算机数据处理系统连接起来，形成多级的计算机综合系统。图1-6表示计算机管理与控制集成系统结构图。

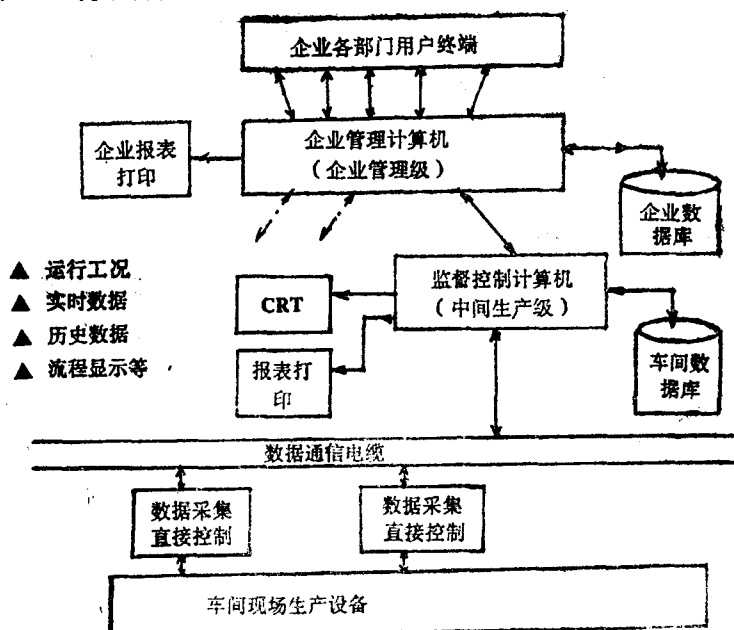


图1-6 计算机管理与控制集成系统

最低层为生产设备控制级，直接进行数据采集和控制；中间层为车间生产级，负责车间各设备间的协调，优化、监督、显示等；最高层为企业管理级，负责全厂各车间生产协调与管理，包括生产计划、经营决策、综合统计分析、事务处理等，实现企业的综合优化管理。

这种管理与控制一体化系统，通过信息传送与流动形成了一个整体，明显地克服了分散自动控制，单项计算机管理以及生产与管理之间通过人工联系等严重的缺陷，大大地提高了工厂综合自动化的水平，增强了企业生产经营的柔性和动态的优化能力，使企业的劳动生产率、产品质量、劳动条件、生产作业调度和经营的作用得到很大的改善。

当今，计算机管理与控制集成系统代表了现代工厂企业自动化的发展方向。国外许多公司已投入巨大的资金和技术力量，加速研制和生产多种类型的计算机管理与控制集成系统。美国Honeywell公司的TDC-3000系统就是一个典型的管理与控制集成系统，已成功用于石油化工、钢铁冶炼等大型企业。

§ 1-2 计算机实时控制的几个特殊问题

一、实时性

计算机实时控制系统对控制对象物理量的采集，做出实时控制对策，并进行实时控制等过程，周而复始地重复进行，而且这些过程要及时地进行。也就是说，计算机的运算和操作速度必须与它所控制的对象实际运行过程相适应。为了达到这一要求，需要从硬件和软件两个方面来保证。在硬件方面要求配备实时时钟和中断优先级处理电路。在软件方面要配备实时操作系统，有实时调度管理程序和中断管理程序。调度管理程序按优先级和并行结合的方式进行处理，即各任务根据其实时性要求划分优先级，管理程序按多道程序处理的概念对各任务进行调度。例如，事故报警优先级高，但在处理事故信息时，打印占用时间较长，因此在优先调用事故报警程序过程中，当完成了事故音响、闪光和显示等的工作后转入事故打印时，调度程序将其分段断开转去执行其他功能模块。

对于实时性要求比较高的系统，除了采取上述措施以外，在应用软件方面也需要采取各种方法提高程序计算和执行速度。例如，采用快速的算法，采用快速语言编程等。总之，要多方法，保证其响应和处理速度。

二、数据采集和变换

数据采集和变换是计算机实时控制的重要组成部分，它是计算机与控制对象交换信息的通道。图1-7表示数据采集和变换部件方块图。

现将数据采集和变换部件的主要部分简述如下。

1. 多通道选择器

多通道选择器实际上是一个多点开关，可以用软件对通道进行选择。例如，可以选用任意一个通道或对各通道顺序扫描方式，依次选用等。并将选用通道的模拟输入量接到采样保持电路中。

2. 采样保持电路

采样保持电路的作用是保持采样得到的模拟量，使它在A/D变换过程中不迅速衰减。

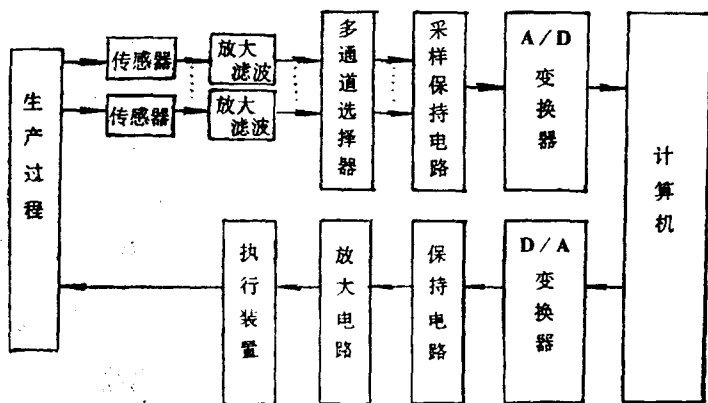


图1-7 数据采集和变换部件方块图

3. 模拟/数字(A/D)变换器

A/D变换器是把模拟信号变换为数字信号。它的一般形式有：逐次逼近式、积分式、计数式和并行式等。逐次逼近式转换速度较高，积分式抗干扰能力较强。目前的计算机都配有A/D变换和D/A变换接口电路，并可用软件编程进行A/D变换，下一章将详细讨论其应用技术。

A/D变换器的分辨能力与变换器的位数 n 有关，

$$\text{分辨率} = \frac{1}{2^n - 1},$$

例如，采用12位的A/D变换器，考虑最高位为符号位，即 $n=11$ ，按上式计算，得分辨率为0.05%，足以与一般变送器的精度相匹配。A/D变换器的其他主要参数，还有变换时间，输出二进制的表示方式（例如原码表示还是补码表示或偏移二进制等）和输入电压范围等。

4. 数字/模拟(D/A)变换器

D/A变换器是把数字信号变换为模拟信号。一般采用权电阻网络及运算放大器来实现。D/A变换器的分辨率与变换器的位数 n 有关。对一个12位的D/A变换器，当最大输出电压为10伏时，分辨能力为5毫伏。D/A变换器的其他主要参数还有变换时间，输出电压范围以及输入二进制方式等。

5. 零阶保持电路

保持电路是用来解决采样点之间的插值问题。最简单的保持器是使在两个连续采样瞬时之间保持常量的信号，这种保持电路称为零阶保持电路。图1-8表示零阶保持电路的输出。

零阶保持电路的断续输出信号近似地重现了作用在采样电路上的信号。

零阶保持电路的脉冲响应可以看作两个阶跃函数之和。即

$$G_h(t) = 1(t) - 1(t-T)$$

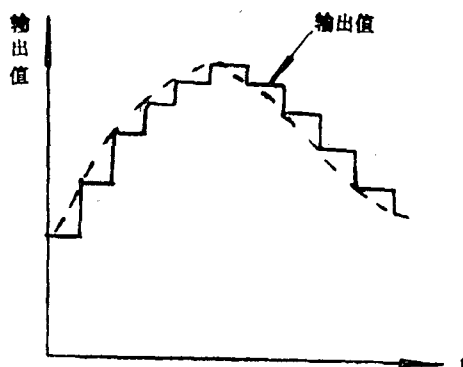


图1-8 零阶保持电路的输出

(1-1)

图1-9表示零阶保持电路的脉冲响应 $G_h(t)$ 特性。

图1-9a的函数可以分解为图1-9b所示的两个函数。由(1-1)式可以求得零阶保持电路的传递函数为

$$G_h(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-Ts}}{s} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (1-2)$$

其中 T 为采样周期。

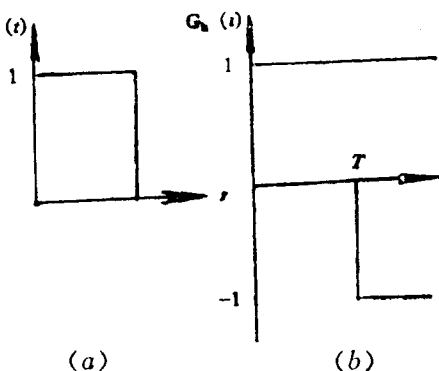


图1-9 零阶保持电路的脉冲响应

三、采样周期

采样周期是采样频率 f_s 的倒数。采样频率太低, 会使零阶保持电路的输入信号与输出信号之间存在着较大的误差, 所以采样频率 f_s 应满足采样定理的要求。采样定理给出了从采样的离散信号恢复到原来连续信号所必须的最低频率。

采样定理可以表述为: 如果系统的连续信号 $y(t)$ 的频谱特性中, 最高频率为 ω_{max} , 那末, 采样离散信号 $y^*(t)$ 能被重建原来的连续信号的最低采样频率 $\omega_s \geq 2\omega_{max}$ ($\omega_s = 2\pi/T$, T 为采样周期)。这一关系式也称香农(Shannon)定理。

离散信号 $y^*(t)$ 的频谱可表示为

$$y^*(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{K=-\infty}^{\infty} Y^*[j(\omega + K\omega_s)] \quad (1-3)$$

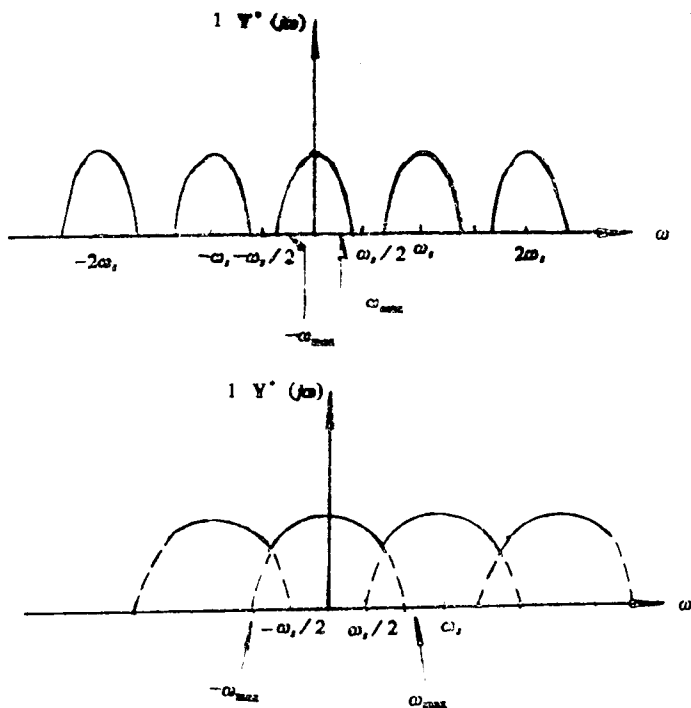


图1-10 $|Y(j\omega)|$ 与 ω 的关系曲线

图1-10表示 $|Y^*(j\omega)|$ 与 ω 的关系曲线。

由图1-10可见, 当 $\omega_s \geq 2\omega_{max}$ 时, 不产生 $|Y^*(j\omega)|$ 波形的交叉重叠。因此, $|Y(j\omega)|$ 的原来形状将被采样过程所保持; 当 $\omega_s < 2\omega_{max}$ 时, $|Y(j\omega)|$ 的原来形状不能真实地保存。

在实际工程中, 由于考虑其他因素, 如闭环系统的稳定性等, 所选择的采样频率应大于采样定理所规定的最低值。此外, 严格地说, 在通信或者控制系统中, 频带限定在某一定值上的物理信号是不存在的, 一般都存在着较宽的频带范围, 最高频率往往高于假定的 ω_{max} 的值。因此, 采样频率的选择应高于采样定理所规定的值, 一般可以取

$$\omega_s \geq (5-10)\omega_{max} \quad (1-4)$$

四、中断处理

当计算机用于实时控制时, 中断是一个十分重要的功能。因为当计算机与外部设备或控制对象交换信息时, 若用查询方式, 则CPU就要浪费很多时间去等待外部设备是否准备就绪, 有了中断功能, 就可以使CPU与外部设备同时工作。CPU在启动外部设备工作后, 就继续执行主程序, 同时外部设备也在工作, 当外部设备把数据准备好后, 发出中断请求, CPU中断它自己的程序, 去响应中断处理, 处理完以后, CPU再恢复执行主程序, 外部设备也继续工作。例如, 在实时控制中, 常用实时时钟作为中断源, 因为在控制中, 常常遇到定时控制问题, 如果用延时程序的方法进行定时控制, 则在这段时间内, CPU就不能进行别的工作, 降低了CPU的利用率。如果采用实时时钟电路, 当需要定时时, CPU启动实时时钟(通常是可编程的, 就是说能用程序来启动实时时钟工作), 启动完毕后, CPU去执行主程序, 同时实时时钟也在工作, 当待定的时间到了后, 实时时钟发出中断申请, CPU中断它自己的程序, 去响应中断处理, 处理完后, CPU再恢复执行主程序。

1. 中断矢量

每一个中断设备都有它自己的中断矢量, 所谓中断矢量就是存放中断服务程序入口地址的地址。因此, 在编制程序时, 首先应将中断服务程序的入口地址用程序方法写入该设备的中断矢量中。当CPU响应中断时, 自动地转到该设备的中断矢量处去寻找中断服务程序的入口地址, 然后转入执行中断服务程序。

2. 中断等级

通常, 在计算机中有许多中断源。例如, 键盘、行打印机、实时时钟、A/D变换接口等都是可以提出中断申请的中断源。在实时控制中, 会发生多个中断源同时提出中断请求的情况, 因此在编制程序时, 根据轻重缓急要给每一个中断源, 确定一个中断级别, 通常称为优先级。当多个中断源同时发出中断申请时, CPU能找到优先级最高的中断源, 响应它的中断请求, 在优先级最高的中断源处理完了以后, 再响应级别较低的中断源。

当CPU响应某一中断源的请求, 正在进行中断处理时, 若有优先级更高的中断源发出中断申请时, CPU就能中断正在进行的中断服务程序, 响应优先级更高的中断, 在高优先级中断处理完了以后, 再进行被中断服务程序。若当发生新的中断申请的中断源的优先级与正在处理的中断源同级或更低时, 则CPU先不响应这个中断申请, 直至正在处理的中断服务程序执行完以后才去处理新的中断申请。

中断等级的设定, 通常是用编程方法实现的。每一个中断源有一个存放中断等级的矢量地址, 只要将需要的中断等级的数码存入这一矢量地址中, 这一设备的中断等级就被确

定了。例如，PDP系列机和VAX机采用的ADV11-C型A/D变换器，它的中断矢量的地址是400₍₈₎，中断等级矢量地址是402₍₈₎，中断等级是用矢量地址所指的内存单元的第5至7码位标定的。图1-11表示ADV11-C型A/D变换器的中断等级设定示意图。

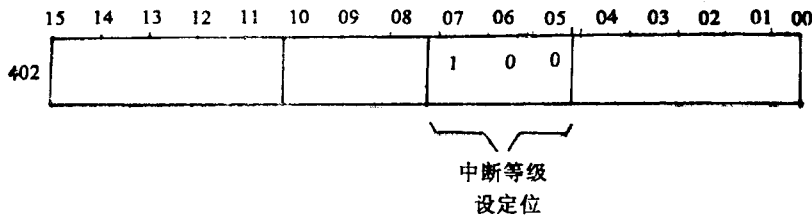


图1-11 ADV11-C型A/D变换器的中断等级设定示意图

通常CPU本身设定的等级为4级，如图1-11所示，这样二—八进制表示为200。如果外部设备要中断CPU所执行的程序，它的中断等级要高于4级。如果A/D变换器的中断等级设定为5级，这样二—八进制表示为240。A/D变换器的中断等级设定可以用下述汇编语言的语句实现，即

```
MOV  #240, @#402
```

上述语句表示中断等级为5级（二—八进制数为240）的数传送到A/D变换器的中断等级的矢量地址中。语句中“@#”在MACRO-11汇编语言中表示绝对寻址方式，即402作为内存的绝对地址。

五、可靠性

计算机实时控制系统的可靠性是至关重要的。为了确保系统的可靠性，对于比较重要的控制对象，一般采用双机工作制，即一台机器作实时控制，另一台机器作离续计算或备用，一旦主机发生故障，备用机可立即代替主机继续工作，保证不间断运行。对于比较次要的控制对象，可以采用冷机备用方法，当主机出故障时，可以用人工启动备用机，代替主机工作。

六、汇编语言

在实时控制中，汇编语言有十分重要的作用。第一，很多接口设备，如A/D、D/A变换器等，不能用高级语言进行编程，只能用汇编语言来编制程序，第二，汇编语言是执行最快的语言，通常在执行一个同样功能的程序，汇编语言的执行速度要比高级语言快几倍，甚至达到十倍。所以对快速性要求特别高的控制系统，采用汇编语言来编制程序，而不采用高级语言。所以对从事计算机实时控制的工程技术人员，必须熟练地掌握计算机汇编语言。

七、程序编制的模块化与层次结构

目前，人们逐渐将程序编制成模块化和层次化。所谓模块化就是在程序中按照功能编制成独立的程序模块，进行分别调试，最后把它们连接起来，成为一个完整的程序。这种编程方法能使错误局部化，提高可靠性。

为了把各独立功能的模块连接成一个系统，功能模块程序必须具有如下的特点。