

陈 辉 堂

数字控制系统

西安交通大学出版社

数字控制系统

陈 辉 堂

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍与计算机控制系统设计有关的控制理论,以及采用微处理器的数字控制系统的实现问题,并通过二个实例介绍了从设计到实现的整个过程。还讨论了由于微处理器有限字长所带来的一些特殊问题。为了便于采用计算机辅助设计,书末还附有一些相应的计算程序。

本书适合工科电类大学生和研究生作为教材使用,或作为学习参考书,也适合作为从事计算机控制的工程技术人员参考书。

数 字 控 制 系 统

解 释 性

责任编辑 董晓梅

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安市蓝田印刷厂印装

陕西省新华书店发行 · 各地新华书店经售

*

· 开本 787×1092 1/32 印张: 10.875 字数: 228千字

1986年10月第1版 1987年7月第1次印刷

印数: 1—3,000册 定价: 1.80元

统一书号: 15340·089

前 言

五十年代中期人们开始研究把数字计算机应用到过程控制系统中来。但是当时的计算机运算速度很慢，价格昂贵而且很不可靠，因此主要用作巡回检测、给操作人员打印操作指导、寻找静态最优工作点、改变模拟调节器的给定值等等。1962年开始直接使用计算机控制生产过程，其优点是使操作过程发生了巨大变化：可以用一个操作台代替一大片模拟仪表盘，而且灵活性很大，改变系统结构非常方便。但是它只适用于大型工厂、控制回路很多的场合。到了六十年代后期，小型机的出现使得计算机可以进入到较小的工程项目，过程控制计算机的应用数目也有很大的增加。更大的变化则发生在1972年微计算机出现之后，由于这类微机价格比较便宜而且价格性能比不断下降，并且可靠性也较高，使得它在许多规模很小的场合也开始向模拟技术挑战，且用微处理器做成的单回路调节器开始与传统的模拟式调节器竞争。另外，采用微处理的分布式计算机控制系统也有了迅速发展。凡此种反映了通用控制器的一个侧面。另一方面，七十年代以来，很大一部分研究工作旨在解决各种专用控制器的问题，采用微处理器设计各种专用数字控制器，探索用微处理器来实现各种高级控制算法（例如状态控制器、自适应控制器等），并且有了很大发展。人们正在努力利用计算机技术的潜力，充分发挥现代控制理论的效用。因此有人评价说，过程控制计算机的应用是缩小控制理论与应用差距的第

一步，而微处理器在自动控制系统中的应用则是缩小控制理论与应用差距的第二步，而且是更大的一步。对于一个从事自动控制的工程技术人员来说，掌握采用微处理器来设计数字控制系统的能力，已经成为迫切的需要。本书就是为了适应这种要求而编写的，它是编者根据在西安交通大学为自动控制和工业自动化专业学生讲授“数字控制系统”课程讲稿整理而成。

本书的主要内容是：与计算机控制系统设计有关的控制理论（包括经典的和现代的）；实现微处理器数字控制系统存在的问题（通过两个实例研究介绍了从设计到实现的整个过程）；由于微处理器有限字长所带来的一些特殊问题的讨论等。为了便于采用计算机辅助设计，书的最后还附有相应的计算程序。

编者感谢西安交大胡保生教授仔细审阅了本书全部手稿并提出了许多宝贵意见；感谢我的研究生们为本书提供了实例研究，并且做成了实验装置供实验使用，使得理论紧密结合实践；其中冯祖仁同志还协助编写了本书的第十一章。

由于编者水平所限，书中难免还有一些缺点和错误，殷切期望广大读者批评指正。

编者 一九八五年十月于西安交大

目 录

第一章 引论

1—1 引言	(1)
--------	-------

1—2 数字控制系统举例	(3)
--------------	-------

第二章 采样过程及其数学描述

2—1 采样过程和采样脉冲的数学表示	(8)
--------------------	-------

2—2 理想开关和脉冲序列的数学表示	(11)
--------------------	--------

2—3 Z 变换	(16)
------------	--------

2—4 Z 变换的基本定理	(26)
-----------------	--------

2—5 从 Z 变换求原函数—— Z 反变换	(32)
----------------------------	--------

2—6 离散Parseval定理	(39)
------------------	--------

2—7 采样信号复原的条件——采样定理	(40)
---------------------	--------

2—8 把采样信号恢复到连续信号——采样信号保持器	(47)
---------------------------	--------

习 题	(52)
-----	--------

第三章 脉冲传递函数

3—1 基本概念	(53)
----------	--------

3—2 采样系统的开环脉冲传递函数	(55)
-------------------	--------

3—3 带有零阶保持器时对象的脉冲传递函数	(57)
-----------------------	--------

3—4 采样系统的闭环脉冲传递函数	(64)
-------------------	--------

习 题	(71)
-----	--------

第四章 数字控制系统的稳态误差和系统稳定性

- 4—1 数字控制系统的稳态误差……………(72)
- 4—2 数字控制系统的稳定条件……………(75)
- 4—3 劳斯稳定判据……………(77)
- 4—4 采样系统稳定性的频域分析法……………(80)

习 题 ……………(83)

第五章 数字控制系统的设计(经典方法)

- 5—1 引言……………(84)
- 5—2 连续校正网络的等效数字滤波器设计
方法……………(84)
- 5—3 在 Z 平面上用根轨迹法进行设计……………(90)
- 5—4 在 W 平面上用频域法进行设计……………(102)

习 题 ……………(109)

第六章 实例研究——数字随动系统的设计与实现

- 6—1 引言……………(111)
- 6—2 数字随动系统的工作原理和方框图……………(111)
- 6—3 采用滞后-超前校正的数字随动系统……………(115)
- 6—4 采用PID校正的数字随动系统……………(121)
- 6—5 结束语……………(125)

第七章 数字控制系统的状态变量法

- 7—1 引言……………(127)
- 7—2 连续系统的状态方程和状态转移方程……………(127)
- 7—3 具有采样和保持的数字系统的状态
方程……………(135)
- 7—4 全数字部件数字系统的状态方程……………(138)

7—5	数字系统的状态转移方程	(139)
7—6	数字定常系统的转移方程	(143)
7—7	用Z变换求解定常离散状态方程	(145)
7—8	状态方程和传递函数之间的关系	(150)
7—9	线性定常系统的特征方程和特征值	(154)
7—10	计算状态转移矩阵的方法	(157)
7—11	化高阶差分方程为状态方程	(166)
7—12	化传递函数为状态方程——数字系统的分解	(169)
习 题		(175)
第八章 数字控制系统的可控性与可观性		
8—1	引言	(178)
8—2	可控性的定义及定理	(180)
8—3	可观性定义及定理	(185)
习 题		(188)
第九章 采用状态空间法设计数字控制系统		
9—1	引言	(190)
9—2	利用状态反馈达到极点配置的数字控制系统的设计方法(一)——单输入情况	(191)
9—3	利用状态反馈达到极点配置的数字控制系统的设计方法(二)——多输入情况	(202)
9—4	同时利用状态反馈和输出动态反馈的数字控制系统的设计方法	(206)
9—5	利用二次型性能指标最优准则的数字控制	

制系统的设计方法	(215)
习 题	(226)
第十章 数字控制系统状态观察器的设计	
10—1 引言	(230)
10—2 全阶观察器的设计	(233)
10—3 降阶观察器的设计	(245)
习 题	(249)
第十一章 实例研究——二级倒立摆数字控制器的设计	
11—1 引言	(251)
11—2 离散数学模型的建立	(252)
11—3 可控性和可观性分析	(255)
11—4 控制器的设计	(256)
11—5 采用微处理器实现数字控制器	(262)
第十二章 采用微处理器实时控制时需要考虑的几个问题	
12—1 引言	(265)
12—2 整量化误差	(266)
12—3 整量化误差在系统输出中的表现	(269)
12—4 系数误差对控制器动态的影响	(274)
12—5 极限环	(276)
12—6 避免极限环的充分条件	(279)
12—7 字长的选择	(285)
12—8 采取微处理器时数字控制器中的时延	(289)
习 题	(295)
参考资料	(295)
附 录 数字控制系统CAD程序包	(296)

第一章 引 论

1—1 引言

近年来,数字控制系统在工业控制中得到了愈来愈多的应用,这一方面是由于微型计算机的迅速发展,另一方面是由于采用数字信号具有许多优越性。

在控制方面的文献中,经常遇到离散系统、采样系统和数字控制系统等名称。它们共同的特点为系统的一部分或几部分是以离散信号的形式出现的。所谓离散信号是指只有在离散时刻出现和变化的信号;一个系统只包含离散信号就叫做离散系统。如果既包含离散信号又包含连续信号就叫做采样系统,而数字系统指的是系统中的某些信号是由数字计算机或者数字变送器产生,并且呈现数码形式的系统。可以这样说,数字系统既包含了离散系统和采样系统的特点和内容,又有它自己的特殊内容,即信号的数字表现形式。

图1—1—1表示一个典型的闭环采样控制系统的基本原理。

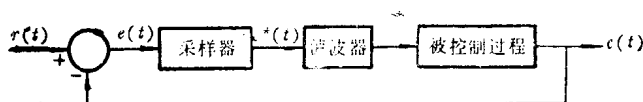


图1—1—1 闭环采样控制系统

图1—1—2表示的为一个采样器的工作方式。连续信号经采样器后得到一串脉冲输出。这里假定采样器具有均匀的采样频率,在采样瞬间,脉冲的幅度代表该瞬间输入信号

$e(t)$ 的数值。

在采样器和被控制过程之间的滤波器的作用是使信号平滑,因为大多数被控制过程是按照接受模拟信号而设计和构造的。

如果采样脉冲序列变换成一串数,那么系统就变为数字控制系统,如图1-1-3所示。

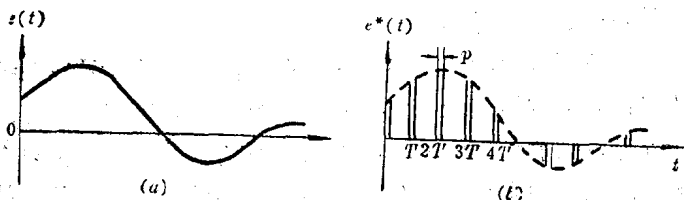


图1-1-2 采样器的工作原理图

(a) 采样器输入的连续信号

(b) 采样器输出的离散信号

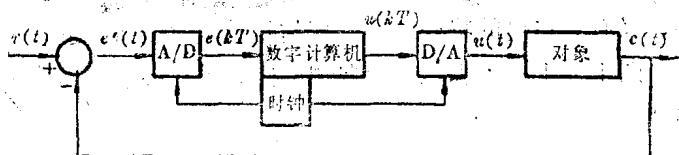


图1-1-3 闭环数字控制系统

图中A/D变换器把一个物理量 $e'(t)$ ——它最常有的形式是电压——变换成一串数 $e(kT)$ 送给数字计算机。时钟定时地每隔 T 秒(采样周期)发出一个脉冲,命令A/D变换器进行变换并由A/D变换器送出一个数给数字计算机。同

时命令D/A变换器把经过计算机处理过的数 $u(kT)$ 变换成一个模拟信号 $u(t)$ 加到对象上去。由于 $e(kT)$ 是在离散时刻出现的，故称之为离散信号，以区别于 $e'(t)$ ， $u(t)$ 等连续信号。A/D变换器提供经过整量化的数字信号，数字计算机就是为了处理这些数字信号而设置的。D/A变换器把离散的数字信号变换成连续信号，这样的系统就叫做数字控制系统。

由数字计算机和接口电路（图1—1—3的A/D，D/A等）组成的控制器谓之数字控制器。

数字控制器的一个显著优点是它们比模拟控制器更为灵活。数字控制器的程序可以随意改变以适应不同的用途，并且可以具备自适应的性能而不必改动硬件。数字部件象数字组件，变送器和编码器，通常比模拟部件更可靠，结构更牢靠，尺寸更紧凑。所有这些以及其它方面的优点，使得数字控制系统得到了飞速的发展。

1—2 数字控制系统举例

在这一节里仅介绍几个典型的数字控制系统及系统的基本构成。

1. 简化了的单轴自动导航控制系统

图1—2—1表示简化了的飞机或导弹的单轴（前后倾斜，偏航或翻滚）模拟式导航控制系统。这是一个典型的模拟或连续控制系统，其中信号可以表示成连续时间变量 t 的函数。控制的目的是使机体的姿态跟随指令信号，引入速率回路是为了改善系统的稳定性。图1—2—1的模拟控制器，可以用如图1—2—2所示的数字控制器替代。

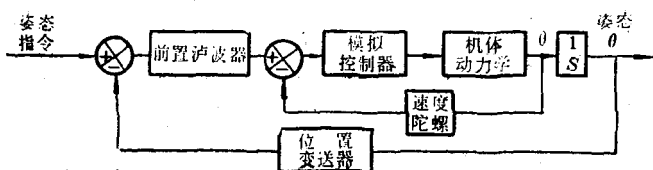


图 1—2—1 简化的单轴自动导航模拟控制系统

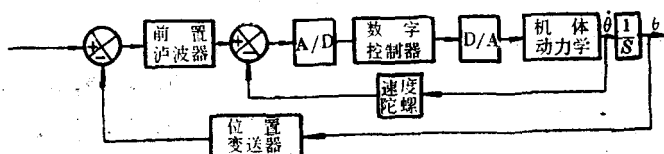


图 1—2—2 简化的单轴自动导航数字控制系统

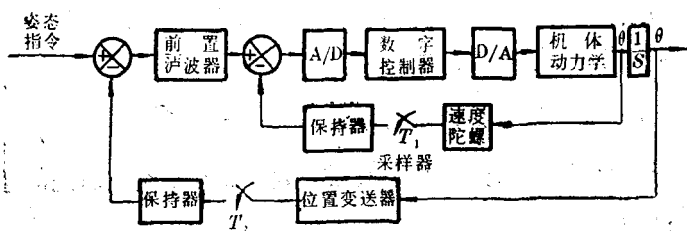


图 1—2—3 简化的具有多重采样频率的单轴数字化自动导航控制系统

图 1—2—3 表示数字式导航控制系统，其中位置和速度信息由数字变送器得到，在方框图上它的动作是经过采样和保持装置来表示。采样器主要是按照均匀的采样周期采集模拟信号，而保持器是为了在下一个采样时刻到来之前保持

信号的数值不变。图 1—2—3 表示两个采样器具有不同的采样周期 T_1 和 T_2 。通常，如果一个回路的信号变化率比另一个慢得多时，在较慢回路中采样器的采样周期可以较大。图 1—2—3 所示的系统中，用了不同采样周期的采样器，这样的系统称为多重频率采样系统。

采样和多重频率采样的使用，可以使系统中某些昂贵的部件按照分时原则工作。

2. 数字计算机控制的轧钢机调节系统

实际上所有现代化的轧钢机都是由数字计算机调节和控制的。图 1—2—4 表示这样一个系统的基本原理。图 1—2—5 表示系统厚度控制部分的方框图。

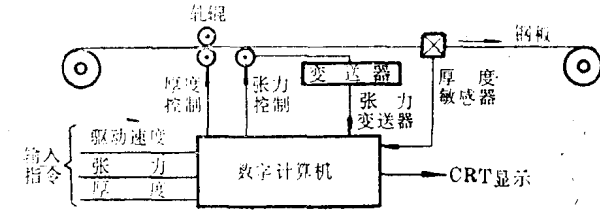


图 1—2—4 数字计算机控制的轧钢机调节系统

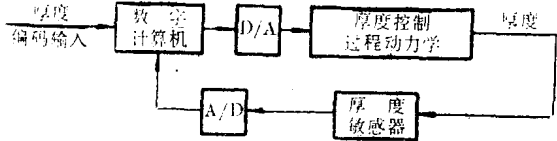


图 1—2—5 轧钢机调节系统的厚度控制

3. 透平和发电机的数字控制器

图 1—2—6 表示透平—发电机组转速和电压控制以及数据收集的小型计算机系统的方框图和基本原理。D/A 变

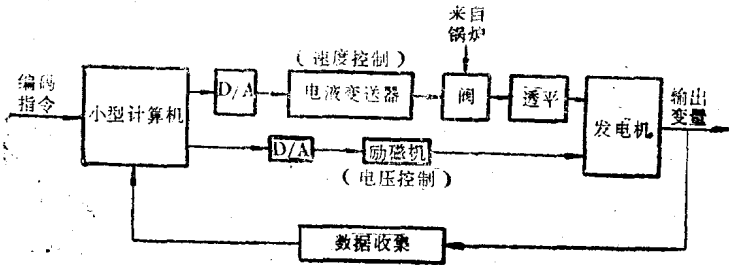


图 1—2—6 透平和发电机组的计算机控制

送器构成数字计算机和速度与电压控制之间的接口。数据收集系统测量诸如发电机转速、转子角度、端电压、磁场与电枢电流，以及有功与无功功率等量。在这些变量中，某些变量可以用数字变送器来测量，数字变送器的输出经数字多路切换后送到计算机，如图 1—2—7 所示。用模拟变送器测



图 1—2—7 数字式数据收集系统

量到的量首先送到模拟多路切换器，模拟多路切换器对不同输入信号按照时间划分原则进行多路切换，每一个输入信号通道以一定的时间周期顺序连接到多路切换器的输出端，多路切换器后面的系统对几个信号通道按时间划分原则共同使

用。图 1—2—8 表示用模拟变送器测量系统变量的数据收

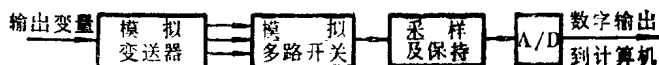


图 1—2—8 具有模拟变送器的数据收集系统

集系统，模拟多路切换器的输出与采样和保持装置相连，后者按照一定的时间间隔对多路切换器的输出进行采样，采样保持器对输出信号加以保持，直到 A/D 变送器完成模—数变换。

4. 步进马达控制系统

图 1—2—9 所示的系统是用来控制计算机记忆磁盘读写头的。该系统不需用 A/D 和 D/A 变换器来使信号匹配，磁盘驱动器系统中使用的驱动装置是由脉冲指令驱动的步进马达。每来一个脉冲，步进马达就转动一个固定的位移增量。因此，这个系统可以看作是全数字化系统。

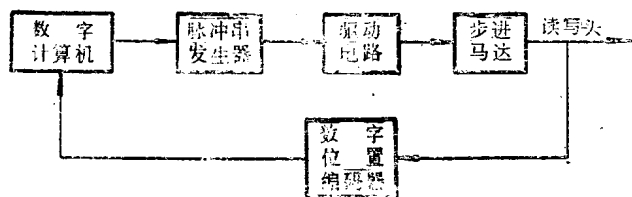


图 1—2—9 磁盘驱动器读写头定位步进马达控制系统

第二章 采样过程及其数学描述

2—1 采样过程和采样脉冲的数学表示

图2—1—1所示为采样开关，采样开关按照一定采样周期 T 闭合，闭合时间为 Δ 。连续信号 $\varepsilon(t)$ 通过采样开关后，就得到采样信号 $\varepsilon^*(t)$ ，如图2—1—2所示。

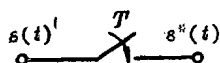


图 2—1—1 采样开关

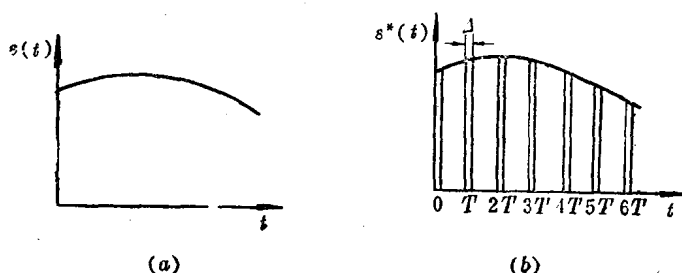


图 2—1—2 采样过程

(a) 采样开关输入

(b) 采样开关输出

现在的问题是这些脉冲如何用数学公式来表示。如果这个问题解决了，一切问题也就迎刃而解了。

从物理概念考虑，如果开关闭合的时间 Δ 与连续系统的主要时间常数相比非常短的话，我们把脉冲的宽度变窄，而