

数字控制系统原理 —分析与设计

● 刘明俊 编

● 国防科技大学出版社



数字控制系统原理 ——分析与设计

刘明俊 编

国防科技大学出版社

内 容 简 介

本书全面地阐述数字控制系统的基本理论,着重介绍系统的分析设计方法,并详细地讨论微型计算机在系统应用中所应考虑和解决的一些重要的实际问题。本书从工程技术角度出发,突出基本理论、基本概念和基本方法,理论与应用结合,设计与实现结合,具有系统性和实用性特点。书中编选了丰富的例题和习题,以帮助读者理解和运用基本理论。

本书可作为自动控制、工业自动化等专业本科生和研究生的教材和教学参考书,还可供控制工程师及有关专业的工程技术人员参考。

数字控制系统原理——分析与设计

刘明俊 编

责任编辑 俞克曜 钟 平

国防科技大学出版社出版发行

湖南省新华书店经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 22.375 字数: 516千字

1990年7月第1版第1次印刷 印数: 1500册

ISBN 7-81024-114-1

TN·9 定价: 4.45元

前 言

数字控制系统又称计算机控制系统,是指微型计算机参与控制的闭环控制系统。近年来,微型计算机和控制技术发展很快,两者的结合推动了数字控制理论与技术的飞速发展。数字控制系统在军事、航天技术、工农业、交通运输、生产管理和经济管理、能源开发与利用等重要部门都获得了广泛的应用,数字控制理论和技术正显示出它的无限生命力。

本书作为控制专业的教材或数学参考书,通过对本书的学习,能够使读者掌握数字控制的基本理论,对数字控制系统组成、工作过程、基本特点能有深入了解,能够掌握数字控制系统分析综合方法,并能具有研究新的数字控制系统、解决实际工程问题的初步能力。

本书主要包括四个部分的内容:第一部分是数字控制系统的理论基础,体现在第二章至第六章的内容里,主要讲述信号的采样与复现、 Z 变换、状态空间分析、稳定性、能控性与能测性及时间域和频率域分析;第二部分内容重点介绍数字控制系统设计综合方法,它包括第七章至第十章的内容。关于经典理论设计方法,有离散与连续等效的设计方法, W 平面设计方法,根轨迹设计方法,数字PID控制器设计,数字控制器直接设计方法,史密斯预估算法和模型算法控制。现代控制理论设计方法,有极点配置与观测器设计,在介绍了离散系统最优控制三大原理(变分法,极大值原理和动态规划)之后,讨论了线性二次型最优控制;第三部分内容介绍了两个有重要实际应用问题:脉冲宽度调制控制系统和多速率采样离散时间控制系统;第四部分包括第十三章至第十五章,介绍了微型计算机和控制算法实现方面的一些实际而又重要的问题,并给出了三个数字控制系统的实例。

本书从工程技术角度出发,突出基本理论、基本概念和基本方法。叙述力求简练、深入浅出,选材瞄准实用,注意理论与应用结合,设计与实现结合,注意系统性和实用性。

国防科学技术大学俞克曜教授仔细审阅了全书手稿,提出了许多宝贵意见,作者表示衷心的感谢。作者向为本书出版给以帮助和支持的所有同志表示谢意。由于作者水平有限,书中缺点错误在所难免,恳切地希望读者批评指正。

刘明俊

1989年5月于长沙

目 录

第一章 引论

1.1 引言	1
1.2 采样数据控制系统	2
1.3 数字控制系统	3
1.3.1 数字控制系统的一般组成	3
1.3.2 数字控制系统的一般类型	4

第二章 信号的采样与复现

2.1 连续信号的采样和星号拉氏变换	7
2.1.1 连续信号的采样	7
2.1.2 理想采样开关的数学描述	7
2.1.3 利用卷积积分计算星号拉氏变换	9
2.1.4 星号拉氏变换 $F^*(x)$ 的特性	14
2.1.5 香农采样定理	15
2.2 信号的复现与保持器	16
2.2.1 信号的复现	16
2.2.2 零阶保持器	17
2.2.3 一阶保持器	20
2.3 过采样和不足采样	22
2.3.1 不足采样: 频率混淆	22
2.3.2 选取采样周期的实际考虑	23
习题	24

第三章 Z变换

3.1 Z变换定理及计算方法	25
3.1.1 Z变换定义	25
3.1.2 基本函数的Z变换	25
3.1.3 求Z变换表达式的一般计算方法	27
3.1.4 Z变换的基本定理	31
3.2 Z反变换	39
3.2.1 幂级数法	39
3.2.2 部分分式法	39
3.2.3 反演积分法	41
3.2.4 用Z变换求解差分方程	44
3.3 线性离散系统的脉冲传递函数	46
3.3.1 脉冲传递函数的定义	46
3.3.2 脉冲传递函数的代数运算规则	48
3.3.3 Z变换法分析闭环系统的响应特性	54
3.4 采样时刻之间的响应	57

3.4.1 子倍数采样方法	58
3.4.2 修正Z变换	60
3.5 具有时间延迟的系统	63
习题	64

第四章 状态空间分析

4.1 离散时间控制系统的状态方程	71
4.1.1 线性离散时间控制系统的状态变量表示法	71
4.1.2 线性定常离散系统的状态方程	71
4.1.3 连续状态方程的离散等效	75
4.2 求解状态方程	78
4.2.1 用递推方法求解状态方程	78
4.2.2 用Z变换方法求解线性定常离散系统状态方程	78
4.3 状态变量表达式和脉冲传递函数的关系	82
4.4 特征方程、特征值和特征矢量	83
4.5 应用状态变量法确定采样时刻之间的响应	84
4.6 具有时间延迟系统的状态方程模型	87
习题	89

第五章 离散时间控制系统的一般性质

5.1 离散系统的稳定性	92
5.1.1 稳定性定义	92
5.1.2 离散线性定常系统的稳定性	93
5.1.3 朱利(Jury)判据	95
5.1.4 W 变换的稳定性判据	98
5.1.5 李雅普诺夫第二方法	99
5.2 能控性、能观测性	101
5.2.1 离散线性定常系统的能控性	101
5.2.2 离散线性定常系统的能观测性	103
5.3 能控性、能观测性的几个特性	104
5.3.1 能控性不变性原理	104
5.3.2 能控性、能观测性同脉冲传递函数的关系	106
5.3.3 采样时间 T 对能控性和能观测性的影响	108
5.3.4 能控性与能观测性的对偶性	109
5.4 能控标准型和能观测标准型	109
5.4.1 能控标准型	110
5.4.2 能观测标准型	112
习题	112

第六章 时间域和频率域分析

6.1 s 平面和 z 平面之间的变换	116
6.2 离散系统的稳态误差	120
6.2.1 离散系统的增益	120
6.2.2 采样时刻的稳态误差分析	121
6.2.3 采样周期对稳态误差的影响	125

6.3 离散系统的频率特性	125
6.3.1 离散定常系统的频率响应	126
6.3.2 幅相频率特性曲线	128
6.4 W 变换和伯德图	131
6.4.1 W 变换	131
6.4.2 伯德图	132
习题	134
第七章 数字控制器设计	
7.1 控制系统的性能要求	137
7.1.1 数字控制系统的一般性能要求	137
7.1.2 参数灵敏度	137
7.1.3 干扰的抑制	138
7.2 离散与连续等效设计方法	140
7.2.1 各种离散化方法	140
7.2.2 离散与连续等效的设计方法	149
7.2.3 预先补偿零阶保持器相位迟后的系统设计方法	150
7.2.4 离散等效系统的稳态误差系数	152
7.2.5 采样周期 T 的选取	152
7.3 W 平面设计方法	153
7.3.1 在 W 平面设计数字控制器一般步骤	153
7.3.2 串联相位迟后补偿	154
7.3.3 串联相位超前补偿	156
7.3.4 用解析法确定一阶补偿器	158
7.3.5 根据预期伪频率特性设计数字控制器	159
7.3.6 在 W 平面设计数字PID控制器	161
7.4 根轨迹设计方法	164
7.4.1 控制系统设计的 z 平面指标	164
7.4.2 根轨迹的绘制	166
7.4.3 采样周期 T 对根轨迹的影响	166
7.4.4 采用根轨迹法进行设计	170
7.5 数字PID控制器设计	175
7.5.1 数字PID控制算法	175
7.5.2 数字PID控制器基本结构	176
7.5.3 数字PID控制算法的改进	177
7.5.4 数字PID控制器参数选择	178
7.5.5 飞行自动着陆系统的数字PID控制器	180
7.6 数字控制器直接设计方法	184
7.6.1 最少拍随动系统设计	184
7.6.2 最少拍无波纹随动系统设计	189
7.6.3 达林算法	91
7.7 史密斯预估算法	194
7.8 模型算法控制	196

7.8.1 模型算法控制原理	196
7.8.2 开环与闭环预测	198
习题	200
第八章 极点配置和观测器	
8.1 极点配置	204
8.1.1 极点配置的基本定理	204
8.1.2 极点配置的一般算法	205
8.1.3 极点配置的阿克曼公式	207
8.1.4 选取设计参数	209
8.1.5 多输入系统的极点配置	211
8.2 状态观测器	213
8.2.1 观测器设计	213
8.2.2 无延迟观测器	216
8.2.3 降阶观测器	218
8.3 伺服系统	220
习题	225
第九章 最优控制	
9.1 离散系统变分法	227
9.1.1 离散系统的欧拉方程	227
9.1.2 一般形式的变分问题	229
9.1.3 有等式约束的变分问题	230
9.2 离散极大值原理	232
9.2.1 无约束离散系统的极大值原理	232
9.2.2 有约束离散系统的极大值原理	235
9.3 动态规划	237
9.3.1 多阶段决策过程	237
9.3.2 最优性原理	238
9.3.3 动态规划基本递推公式	238
9.3.4 动态规划的通用计算方法	243
习题	245
第十章 离散系统线性二次型最优控制	
10.1 有限长时间线性数字调节器	249
10.1.1 二次型性能指标	249
10.1.2 有限长时间线性数字调节器	250
10.1.3 一般形式二次型性能指标	255
10.2 无限长时间线性数字调节器	256
10.3 输出调节器	258
10.4 伺服系统的二次型最优控制	259
10.5 采样数字系统的二次型最优控制	262
习题	265
第十一章 脉冲宽度调制控制系统	
11.1 引言	268

11.1.1 单极式和双极式脉冲宽度采样	268
11.1.2 自然采样和均匀采样	271
11.1.3 脉冲宽度调制系统的特点	271
11.2 分析脉冲宽度调制控制系统的 Z 变换方法	272
11.2.1 等效面积原理	272
11.2.2 脉冲宽度调制系统的 Z 变换分析法	273
11.3 脉冲宽度调制的谐波模型	275
11.3.1 双极式脉冲宽度采样双描述函数模型	275
11.3.2 脉冲宽度调制控制系统的谐波模型分析	278
第十二章 多速率采样离散时间控制系统	
12.1 引言	281
12.2 多速率采样的无穷级数表达式	282
12.3 多速率采样系统的 Z 变换分析法	283
12.3.1 慢—快多速率采样系统	283
12.3.2 快—慢多速率采样系统	285
12.3.3 全部为数字元件的多速率采样系统	288
12.3.4 不同采样速率的纯数字元件的联接	289
12.3.5 闭环多速率采样系统	290
12.4 多速率采样系统的时间域分析	292
12.4.1 慢—快多速率开环采样系统的输出响应	292
12.4.2 快—慢多速率开环采样系统的输出响应	293
12.4.3 多回路、多速率采样闭环系统状态方程及输出响应	295
习题	296
第十三章 数字控制器结构实现	
13.1 直接实现形式	299
13.1.1 数字控制器的四种直接实现形式	299
13.1.2 二阶模型的四种直接实现形式	301
13.2 串联实现	303
13.3 并联实现	303
13.4 数字PID 控制器结构实现	303
习题	304
第十四章 数字控制器的微机实现	
14.1 数的表示法及量化误差	306
14.1.1 数的二进制表示	306
14.1.2 二进制数截尾和舍入	307
14.2 量化误差分析	309
14.2.1 模拟信号采样过程的量化误差	310
14.2.2 系数量化误差及其对系统性能的影响	312
14.2.3 乘法运算结果量化误差分析	316
14.3 输出量化噪声	317
14.3.1 数字控制器噪声模型	317
14.3.2 随机信号通过线性定常离散系统	318

14.3.3 不同实现结构的输出方差比较	320
14.4 量化非线性效应产生的极限环振荡	322
14.4.1 定点数实现数字控制器的零输入极限环	322
14.4.2 定点小数补码求和产生的溢出振荡	324
14.4.3 量化效应产生的闭环极限环	324
14.5 计算机字长的选取	325
14.5.1 A/D变换器字长	325
14.5.2 运算器字长	326
14.5.3 系数存贮字长	326
14.5.4 数模转换器字长	327
14.5.5 闭环系统的字长选择	327
14.6 在有限字长约束下实现数字控制器算法	328
14.6.1 二阶模型串联实现	328
14.6.2 二阶模型并联实现	333
14.7 干扰的滤波	334
14.8 计算机时延	335
习题	336
第十五章 数字控制系统设计举例	
15.1 磁悬浮球数字控制系统	338
15.2 恒温箱温控数字控制系统	341
15.3 关节倒摆数字控制系统	343
参考文献	

第一章 引 论

1.1 引 言

数字计算机在控制工程中的主要用途有两个方面：在复杂的控制系统的分析、综合任务中进行数字仿真和完成复杂的计算工作；数字计算机作为控制系统中的一个重要组成部分，完成预先规定的各种控制任务。本书主要讨论数字控制系统的一些主要特性，并重点突出系统的分析和设计方法。

控制系统中的信号一般可以分为四种类型（如图 1.1 所示）：时间是连续的，信号的幅值是连续的，称连续时间模拟信号；连续时间阶梯形模拟信号如图 1.1(b) 所示；采样数据信号是时间离散、幅值连续的脉冲信号；数字信号是时间离散的、信号的幅值也是离散的。

采样数据信号是一串幅值调制的脉冲，每个脉冲的幅值在数值上是连续的；而数字信号通常指由数字计算机和数字式传感器所产生的信号，它的幅值是量化的，以某种形式的编码表示。采样数据信号和数字信号统称离散时间信号。

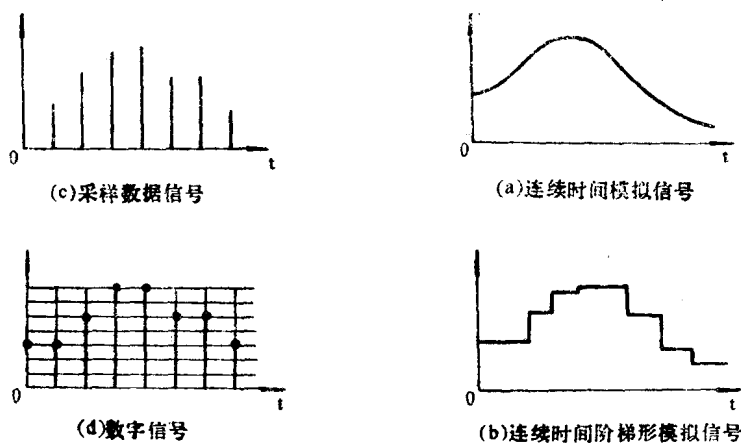


图 1.1 四种类型信号形式

在数字控制系统中的信号有一处或几处的信号是离散时间信号，该控制系统称离散时间控制系统。如果内部的离散时间信号属于采样数据信号，称采样数据控制系统；内部的信号属于数字信号，称数字控制系统。大多数实际控制系统，既含有连续时间信号也含有离散时间信号。我们采用离散时间控制系统这一术语从广泛的含义上来描述所有这一类系统。

虽然数字控制系统和采样数据控制系统在结构和元件上存在着基本差别，我们将指出：从分析的观点，两种类型系统分析方法是相同的。

1.2 采样数据控制系统

图1.2指出了采样数据控制系统的基本元件和结构。采样器可以简单表示为一个元件或理解为一种操作，一个连续信号送到采样器后，它的输出是一串脉冲序列，相邻两脉冲之间不传送任何信息，图1.3表明采样过程的一般原理。其中误差信号 $e(t)$ 送至采样器的输入端， $e^*(t)$ 是采样器的输出信号，它是一串脉冲序列。 T 称采样周期， τ 是采样脉冲的实际宽度。

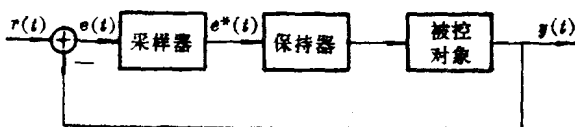


图 1.2 闭环采样数据控制系统

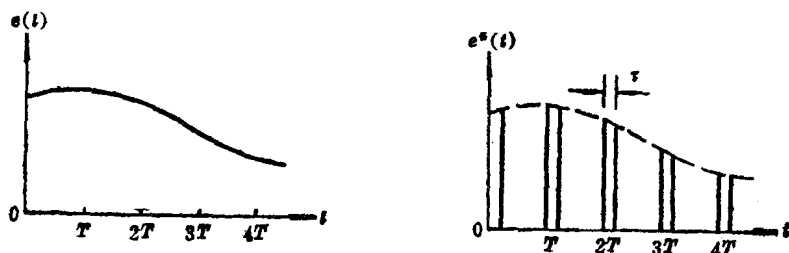


图 1.3 连续时间信号的实际采样过程

通常在被控对象和采样器之间设置一滤波器，因为大多数被控对象都是接受连续控制信号的。滤波器主要作用是平滑采样输入信号，使系统输出平稳。

在实际应用中，比较重要的采样形式有下面几种：

- (1) 周期采样：采样周期是常值不变的，采样脉冲的宽度忽略不计(见图1.4(a))。
- (2) 异步采样：两个采样器的采样周期相同，但采样瞬时相差 δT 时刻，如图1.4(b)所示。异步采样又称交错采样。
- (3) 周期速率采样：采样速率是周期的改变，如图1.4(c)所示。
- (4) 多速率采样：系统中存在两个以上的采样器，每个采样器的采样周期是不同的(见图1.4(d))。
- (5) 慢变速率采样：采样周期缓慢变化，如图1.4(e)所示。
- (6) 分段常值速率采样：在每一段时间内采样周期不变，如图1.4(f)所示。
- (7) 脉冲宽度调制采样：脉冲宽度调制的输出脉冲，其周期和幅值不变，脉冲宽度与被采样信号在采样时刻的幅值成比例，脉冲宽度调制采样的输入、输出波形如图 1.4(g)所示。

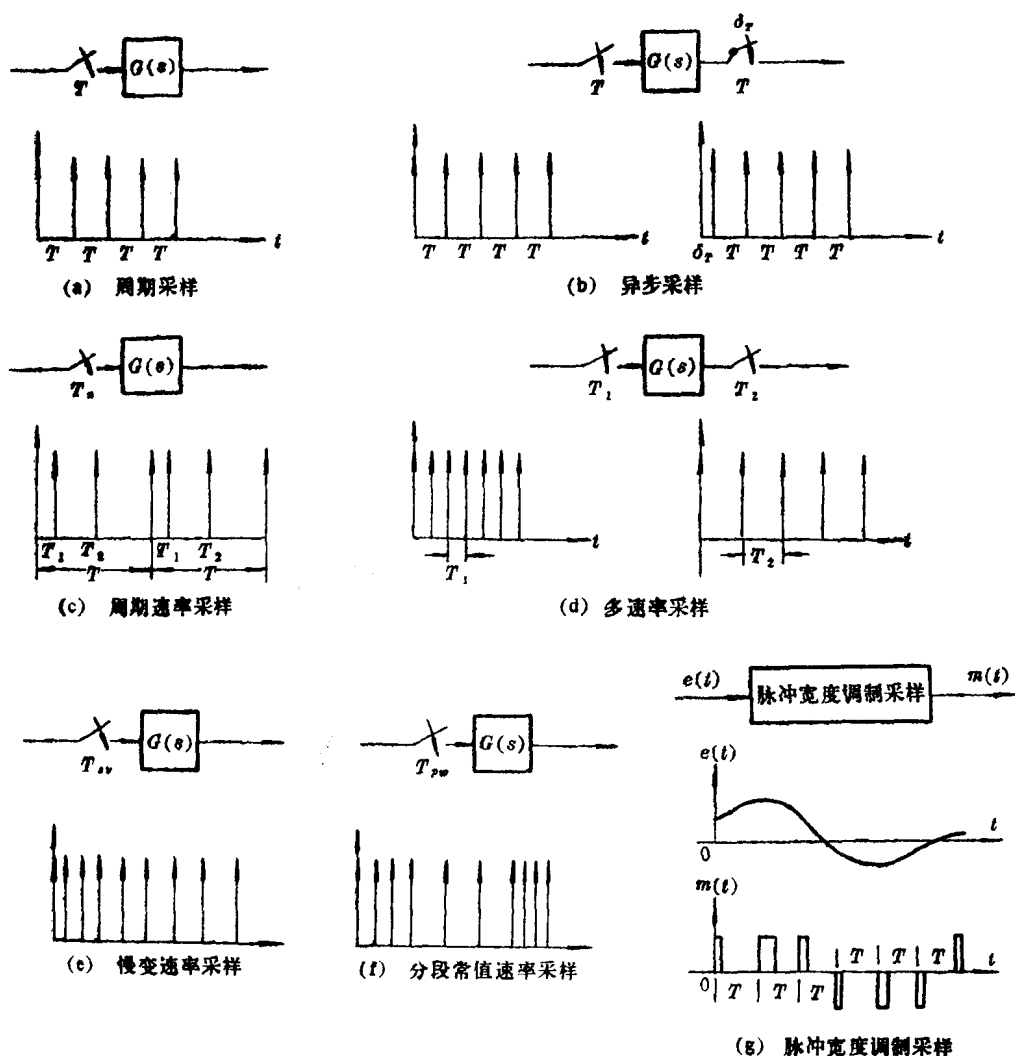


图 1.4 几种典型的采样形式

1.3 数字控制系统

1.3.1 数字控制系统的一般组成

数字控制系统的一般组成如图1.5所示，数字控制系统的硬件一般包括：

(1) 主机，通常包括微处理器(CPU)和内存存储器(ROM, RAM)，它是数字控制系统的核心。主机根据由输入通道送来的命令和测量信息，按照预先编制好的控制程序，按照一定的控制规律进行信息处理、计算，形成的控制信息由输出通道送至执行机构和有关设备。

(2) 测量元件和执行机构，测量元件包括数字测量元件和模拟测量元件，执行机构根据需要可以接受模拟控制量和数字控制量。

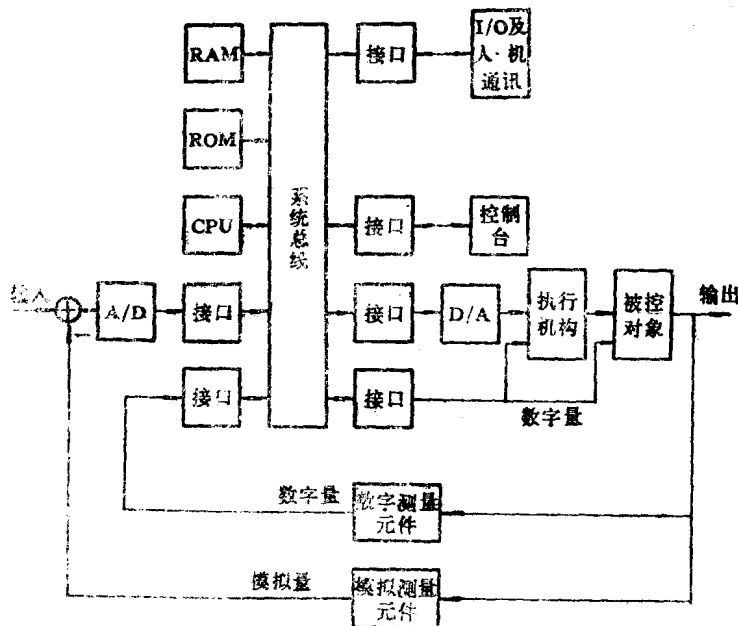


图 1.5 数字控制系统的一般组成

(3) 输入输出通道又称过程通道，输入输出通道把计算机与测量元件，执行机构，生产过程和被控对象连接起来，进行信息的传递和变换。输入输出通道一般可分为模拟量输入通道、数字量输入通道、模拟量输出通道和数字量输出通道。模拟量输入输出通道主要由A/D变换器和D/A变换器组成。

(4) 接口电路，输入输出通道、控制台等设备是通过接口电路传送信息和命令，接口电路一般有并行接口、串行接口和管理接口。

(5) 控制台，操作人员通过运行控制台与计算机进行“对话”，随时了解生产过程和控制状态，修改控制参数、控制程序，发出控制命令，判断故障，进行人工干扰等。

1.3.2 数字控制系统的一般类型

1. 巡回检测和数据处理系统

巡回检测和数据处理系统是计算机应用于过程控制的最早形式之一。计算机对一次性仪表产生的参数巡回检测，并由计算机进行必要的数据处理，如数字滤波、仪表误差修正等；对大量的数据进行记录，对过程进行集中监视，根据事先存入的各种参数的极限值，处理过程中可进行越限报警，以确保生产过程的安全。巡回检测和数据处理系统的结构图如图1.6所示，这是一个开环控制系统，计算机不直接参与过程控制，对生产过程不会直接产生影响。

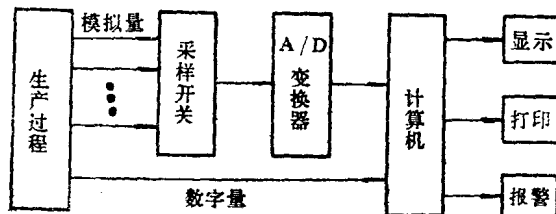


图 1.6 巡回检测和数据处理系统结构图

2. 直接数字控制系统(DDC)

直接数字控制系统的基本组成如图1.7所示,它是在巡回检测和数据处理的基础上发展起来的,数字计算机是闭环控制系统的组成部分,计算机产生的控制量经输出通道直接作用于生产过程,故有“直接数字控制”之称。直接数字控制系统除了有数据采集、报警、打印、记录、显示功能外,可以根据事先编好的控制程序,实现各种控制规律和操作,因而有效地提高了控制系统的性能。

3. 监督控制系统(SCC)

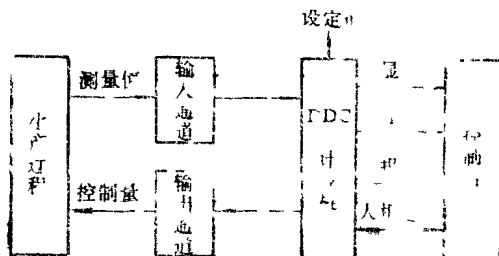


图 1.7 直接数字控制系统

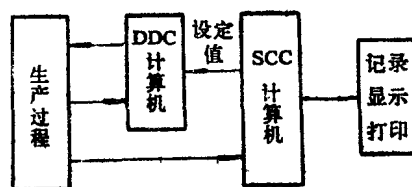


图 1.8 监督控制系统

监督控制系统是一个二级控制系统,DDC计算机直接对被控对象和生产过程进行控制,其功能类似于DDC直接数字控制系统。直接数字控制系统的设定值是事先规定的,但监督控制系统可以通过对外部信息的检测,根据当时的工艺条件和控制状态,按照一定的数学模型和优化准则,在线计算最优设定值,并及时送至下一级DDC计算机,实现自适应控制,使控制过程始终处于最优状态。

最简单的数字控制系统是用数字控制器代替连续控制系统的模拟控制器,图1.9是一个连续自动驾驶仪控制系统的结构图,系统中所有的信号都是连续时间信号。控制系统的任务是使飞行器姿态角稳定,或者能准确跟踪输入控制指令。用数字控制器代替模拟控制器便成为一个数字式自动驾驶仪控制系统(见图1.10)。系统中的速率陀螺和角度传感器仍然是模拟式的,为了实现信号匹配,采用A/D,D/A变换器。

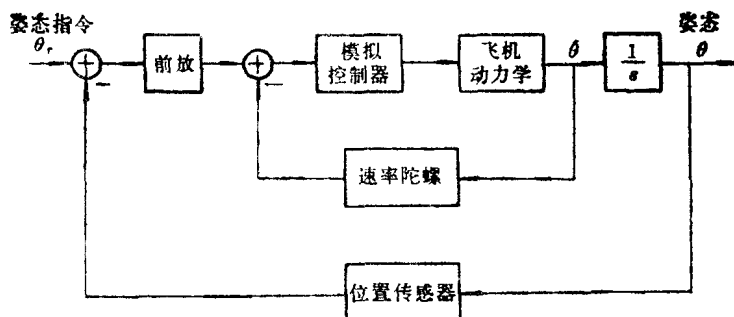


图 1.9 单通道连续自动驾驶仪控制系统

如果速率陀螺和角度传感器是数字式的,这类数字式自动驾驶仪结构图如图1.11所示。系统可以具有三个不同的采样周期,A/D变换器的采样周期为 T_s ,另外两个采样周

期分别为 T_2 和 T_1 。一般说,系统中小回路的信号具有较大的变化率,因此小回路可以采用小采样周期,大回路(外回路)采用较大的采样周期。这种具有不同采样周期的数字控制系统称多速率数字控制系统。

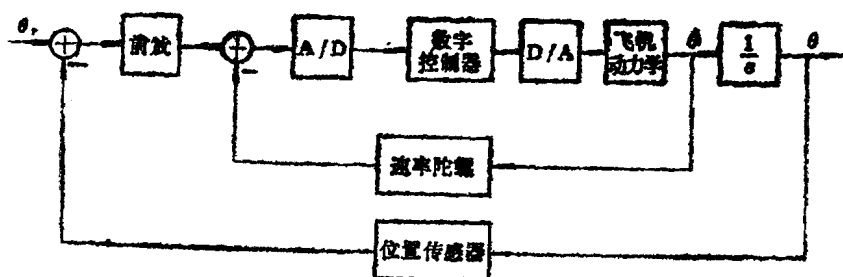


图 1.10 单通道数字式自动驾驶仪控制系统

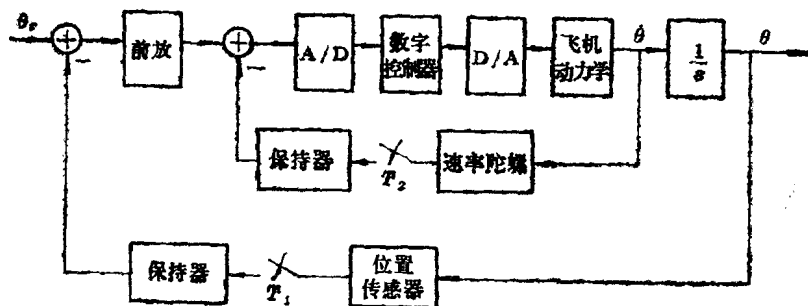


图 1.11 单通道自动驾驶仪多速率数字系统

第二章 信号的采样与复现

2.1 连续信号的采样和星号拉氏变换

2.1.1 连续信号的采样

把连续信号变换为脉冲序列的过程称采样, 实现连续信号采样的一个简便方法就是用一序列离散值代替连续信号, 采样值是采样时刻的信号幅值。现在研究周期采样, 周期采样时刻表示为

$$t_k = kT, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

其中 T 称采样周期。实现采样的装置称采样器或称采样开关。理想采样开关指采样过程是瞬时完成的, 采样脉冲序列的脉冲宽度为无限小的。理想采样过程及表示法如图 2.1 所示, 用符号 S 表示采样开关。

$$\text{令} \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

其中 ω_s 称采样角频率; f_s 称采样频率。

实际采样开关的采样过程如图 1.3 所示, 采样开关的闭合时间 $\tau \neq 0$, 即采样脉冲的宽度 $\tau \neq 0$ 。但是, 由于 $\tau \ll T$, 且 $\tau \ll$ 系统连续部分最大时间常数, 因此, 实际应用时, 可以近似认为 $\tau = 0$, 把实际采样开关作为理想采样开关处理。

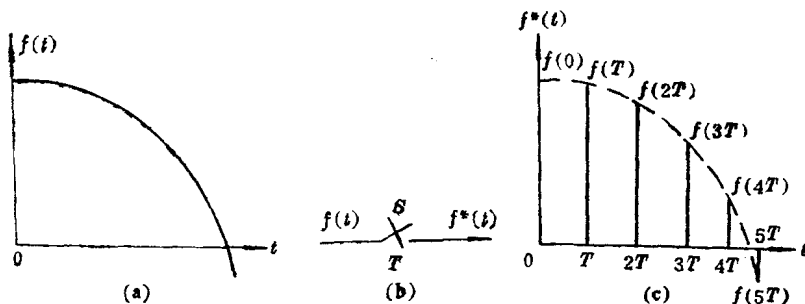


图 2.1 理想采样开关及采样过程

2.1.2 理想采样开关的数学描述

采样是离散时间控制系统的基本特征, 为了分析它对系统的影响, 必须把理想采样过程用数学模型表示。