

数 字 控 制 系 统

〔联邦德国〕 罗尔夫·伊泽曼 著

盛国华等 译

化 学 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书主要讨论计算机控制的软件。它为微处理器、数字机在控制系统中的应用提供了深入完备的理论基础和具体应用的设计步骤及控制算式。书中研究了确定性、随机、多回路、多变量、自适应等控制系统、对参数最优、相消、临界阻尼、状态、预估、最小方差等调节器进行推导,比较它们的控制性能、灵敏度、应用范围、稳定域,对采样周期、加权因子、操作变量初始值等工程实际问题提出设计、选择的原则。自适应控制是全书的重点,主要讨论各种参数估计方法及其和各种调节器的组合。

全书内容丰富,讲解深入浅出,为自控和计算机操作工作者进行数字控制、编制程序、调试回路等工作从理论和实践两方面提供具体有益的指导和帮助,很适合自控和计算机的工程技术人员阅读,也可作为大中专各类自控和计算机专业的师生作为辅助教材。

Digital Control Systems

Rolf Isermann

Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1981

数 字 控 制 系 统

盛国华 等译

责任编辑:李涌雪

封面设计:许立

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $23^{1/2}$ 字数576千字印数1—5,040

1986年7月北京第1版1986年7月北京第1次印刷

统一书号15063·3773 定价4.80元

目 录

1. 绪论	1
A 过程和过程计算机	5
2. 数字计算机控制 (过程计算机、微处理机)	5
3. 离散时间系统	9
3.1 离散时间信号	9
3.1.1 离散时间函数 差分方程	9
3.1.2 脉冲序列	12
3.2 离散时间函数的拉氏变换	13
3.2.1 拉氏变换	13
3.2.2 采样定理	13
3.2.3 保持元件	15
3.3 z 变换	16
3.3.1 z 变换概述	16
3.3.2 z 变换定理	17
3.3.3 z 反变换	17
3.4 卷积和与 z 传递函数	17
3.4.1 卷积和	17
3.4.2 脉冲传递函数和 z 传递函数	18
3.4.3 z 传递函数的性质	20
3.5 极点和稳定性	22
3.5.1 z 平面中极点的位置	22
3.5.2 稳定条件	24
3.5.3 经过双线性变换的稳定准则	24
3.6 状态变量表达法	25
3.7 过程的数学模型	34
3.7.1 工艺过程的基本类型	34
3.7.2 从连续时间模型确定离散时间模型	36
3.7.3 离散时间信号过程模型的简化	40
3.7.4 过程模型化和过程识别	43
B 确定性扰动的控制系统	45
4. 确定性控制系统	45
5. 参数最优化调节器	50
5.1 连续PID调节器微分方程的离散化	50
5.2 低阶参数最优化离散控制算法	51

5.2.1 一阶和二阶控制算法	53
5.2.2 规定初始操作变量的控制算法	56
5.3 离散PID控制算法的修正	57
5.4 仿真结果	58
5.4.1 试验过程	59
5.4.2 二阶控制算法的仿真结果	60
5.5 参数最优化控制算法采样周期的选择	71
5.6 参数最优化控制算法的整定规则	73
6. 相消调节器	79
7. 有限回复时间调节器 (临界阻尼)	82
7.1 普通阶次的临界阻尼调节器	82
7.2 增加阶次的临界阻尼调节器	85
7.3 临界阻尼调节器采样周期的选择	88
8. 状态调节器	90
8.1 对初始值最优的状态调节器	90
8.2 对外扰动最优的状态调节器	97
8.3 给定特征方程的状态调节器	100
8.4 模式状态控制	101
8.5 有限回复时间状态调节器 (临界阻尼)	105
8.6 状态观测器	106
8.7 有观测器的状态调节器	108
8.7.1 初始值观测器	109
8.7.2 外扰动观测器	110
8.8 降维状态观测器	116
8.9 加权矩阵和采样周期的选择	119
8.9.1 状态调节器和观测器的加权矩阵	119
8.9.2 采样周期的选择	120
9. 用于大死时过程的调节器	121
9.1 有死时过程的模型	121
9.2 用于有死时过程的确定性调节器	122
9.2.1 有大死时和附加动特性的过程	122
9.2.2 纯死时过程	123
9.3 不同调节器用于有死时过程的控制性能和灵敏度的比较	126
10. 恒定调节器控制参数可变过程	133
10.1 闭环系统的灵敏度	133
10.2 参数大范围变化过程的控制	137
11. 克服确定性扰动的各种调节器的比较	139
11.1 调节器结构比较: 极点和零点	139
11.1.1 规定极点的一般线性调节器	140

11.1.2 低阶参数最优调节器	141
11.1.3 一般相消调节器	142
11.1.4 临界阻尼调节器	142
11.1.5 预估调节器	143
11.1.6 状态调节器	144
11.2 比较性能用的特征值	146
11.3 控制算法性能比较	147
11.4 动态控制因子的比较	154
11.5 控制算法使用小结	158
C 随机扰动的控制系统	160
12. 随机控制系统	160
12.1 初步介绍	160
12.2 随机信号过程的数学模型	160
12.2.1 基本定理	160
12.2.2 马尔柯夫信号过程	162
12.2.3 标量随机差分方程	163
13. 随机扰动参数最优调节器	165
14. 随机扰动最小方差调节器	167
14.1 无死时过程的广义最小方差调节器	167
14.2 有死时过程的广义最小方差调节器	172
14.3 无余差最小方差调节器	175
14.3.1 附加积分作用项	175
14.3.2 控制偏差的最小化	176
14.4 纯死时过程的最小方差调节器	176
14.5 最小方差调节器的仿真结果	177
15. 随机扰动状态调节器	181
15.1 对白噪声最优状态调节器	181
15.2 有状态估计对白噪声最优的状态调节器	183
15.3 有状态估计对外扰动最优的状态调节器	184
15.4 状态估计(卡尔曼滤波器)	187
15.4.1 两个向量测量值的加权平均	189
15.4.2 向量状态的递推估计	190
D 多回路控制系统	194
16. 串级控制系统	194
17. 前馈控制	199
17.1 相消前馈控制	200
17.2 参数最优前馈控制	202
17.2.1 不规定操作变量初始值的参数最优前馈控制	202
17.2.2 规定操作变量初始值的参数最优前馈控制	202

17.3 状态变量前馈控制	205
17.4 最小方差前馈控制	205
E 多变量控制系统	208
18. 多变量过程的结构	208
18.1 传递函数表达法的结构特性	208
18.1.1 正则结构	208
18.1.2 特征方程与耦合因子	211
18.1.3 外部信号的影响	214
18.1.4 主调节器的相互作用	214
18.1.5 矩阵多项式表达法	216
18.2 状态表达法的结构特性	216
19. 参数最优化多变量控制系统	220
19.1 不带耦合调节器的主调节器参数最优化	221
19.1.1 稳定域	222
19.1.2 调节器参数最优化和双变量调节器整定规则	225
19.2 用(无互作用的)耦合调节器解耦	227
19.3 主调节器和耦合调节器的参数最优化	230
20. 多变量矩阵多项式控制系统	231
20.1 一般矩阵多项式调节器	231
20.2 矩阵多项式临界阻尼调节器	231
20.3 矩阵多项式最小方差调节器	232
21. 多变量状态控制系统	234
21.1 多变量极点配置状态调节器	234
21.2 多变量矩阵黎卡提状态调节器	234
21.3 多变量解耦状态调节器	234
21.4 多变量最小方差状态调节器	235
F 基于过程识别的自适应控制系统	236
22. 自适应控制系统——简短的回顾	236
23. 动态过程和随机信号的在线识别	238
23.1 过程和信号模型	238
23.2 递推最小二乘法(RLS)	239
23.2.1 动态过程	239
23.2.2 随机信号	243
23.3 递推扩充最小二乘法(RELS)	244
23.4 递推辅助变量法(RIV)	245
23.5 递推最大似然法(RML)	245
23.6 随机近似法(STA)	248
23.7 一种统一的递推参数估计法	248
23.8 递推参数估计法的数值修正	250

24. 闭环识别	252
24.1 无扰动时的参数估计	252
24.1.1 间接过程识别 (情况 a + c + e)	253
24.1.2 直接过程识别 (情况 b + d + e)	256
24.2 有扰动时的参数估计	258
24.3 闭环参数估计法	259
24.3.1 无扰动间接过程识别	260
24.3.2 无扰动直接过程识别	260
24.3.3 有扰动直接过程识别	260
25. 参数自适应调节器	261
25.1 概述	261
25.2 适合的控制算法	264
25.2.1 临界阻尼控制算法	264
25.2.2 最小方差调节器	264
25.2.3 参数最优调节器	266
25.2.4 极点配置的一般线性调节器	268
25.2.5 状态调节器	268
25.3 参数估计和控制算法 (单输入、单输出) 的适当组合	269
25.3.1 确定等价参数自适应调节器	269
25.3.2 随机参数自适应调节器	273
25.3.3 确定性参数自适应调节器	276
25.4 不同的参数自适应调节器通过仿真的比较	276
25.5 一些先验因子的选择	284
25.6 应用举例	285
25.6.1 空气加热器的自适应控制	285
25.6.2 pH过程的自适应控制	285
25.7 参数自适应前馈控制	289
25.8 参数自适应多变量调节器	291
G 应用过程计算机和微型机的数字控制	297
26. 幅值整量化对数字控制的影响	297
26.1 产生整量化效应的原因	297
26.1.1 模拟输入	297
26.1.2 中央处理单元(CPU)	298
26.1.3 模拟输出	299
26.2 各种整量化效应	300
26.2.1 变量的整量化效应	300
26.2.2 系数的整量化效应	303
26.2.3 中间结果的整量化效应	303
27. 扰动的滤波	306

27.1 控制系统中的噪声源和噪声频谱	306
27.2 模拟滤波	308
27.3 数字滤波	309
27.3.1 低通滤波器	310
27.3.2 高通滤波器	312
27.3.3 特殊滤波器	313
28. 控制算法和执行机构的组合	316
29. 计算机辅助设计控制算法	323
30. 识别和数字控制的实例	326
30.1 热交换器的数字控制	326
30.2 回转干燥器的数字控制	328
30.3 蒸汽锅炉的数字控制	336
30.3.1 两输入/两输出过程识别和参数最优调节器的计算机辅助设计 (程序包 OLID-MIMO, CADCA-MIMO, CAFCA-SISO)	336
30.3.2 可代替的单输入/单输出自整定控制 (程序包ADREG)	337
30.3.3 两输入/两输出自适应控制 (程序包MACS)	337
30.4 结论	341
附录	343
缩写和符号一览表	348
参考文献	351
术语索引	360

1. 绪 论

多级过程控制

工业过程的全局控制可以描述为如图 1 所示的递阶控制形式。

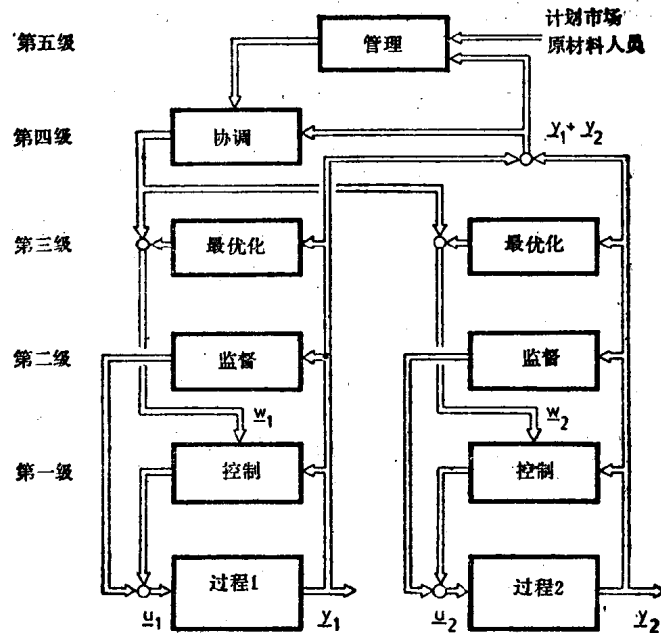


图 1.1 多级过程控制

第一级用前馈或反馈的方法控制直接可测的变量 y 。参考值 w 既可是常数也可由上一级提供。如果要控制的变量多于一个，称为多变量控制。自动开停车也看作是第一级的一部分。

第二级是过程监督。检查过程的各项功能例如测试指定的参数是否超过某一限值。监督可以仅限于当前的变量参数，但也可包括预估将来的变量值；监督这一级的输出是提醒工艺人员的报警。如果能自动处理工艺装置的故障和停车称为保安控制。

第三级组织过程的最优化，使产量和效率达到最高或者使消耗及成本降至最小。稳定性能的最优化常常最为重要，称为稳态最优化。如实现在线最优化，则其性能指标按测量到的 y 值计算，并使用最优化方法通过系统地改变输入值，即参考值 w 来搜索性能指标的极值。

如果有几个过程连结在一起，第四级可以协调它们的工作。对一组火力和水力发电厂这种协调指的是负荷的分配，而对钢铁工业的整套设备协调就是高炉、炼钢厂和轧钢厂之间相互配合。

再高一级，即第五级是所谓的管理。整个工艺系统（工厂、相互交叉的网络、大的经济联合体）按照计划市场，原材料的供应和雇用人员来组织。

在上述各级中都可应用前馈和反馈控制的原理。假如使用反馈控制，同控制回路一样可

以讲监督回路、最优化回路和协调回路或通常说多级控制回路。

从历史上看过程控制的某些任务原是手工操作进行,这在某些工厂目前仍然如此。随着自动化的增加,仪表首先接替低级的工作。直到1960年左右才用电动、气动、液动的模拟调节器实现自动控制。应用二进制信号的电动或气动单元来实现程序控制,并用模拟或二进制数字设备进行监督控制。过程的最优化或协调仅由人工执行或根本没有。数字计算机离线运行有可能使上层工作实现部分自动化。

过程计算机的应用

数字过程计算机的应用,无论从结构或功能上都影响到过程控制的自动化。下面阐述开发的各个阶段。

1959年第一台过程计算机投入在线运行,但主要是开环数据记录、数据处理和过程监督。过程变量的直接控制由模拟设备执行,主要是因为当时计算机的可靠性太低。那时模拟调节器的参考值(给定点)由过程计算机(管理控制)按照时间表或过程最优化给定。从1962年以后在化学工业和发电厂过程计算机开始以闭环形式投入在线运行作为直接数字控制(DDC) [1.1], [1.2], [1.3], [1.4], [1.5], [1.6]。

大型过程计算机的研制和相应软件的开发,使过程控制应用的计算机大大增加。今天计算机已是过程自动化的标准设备 [1.5], [1.6]。详尽的细节参考 [1.7] 到 [1.14] 的书籍。过程计算机直到最近主要还是应用于直接控制、监督、协调以及数据记录和数据处理等工作 [1.7]~[1.11]。在线的最优化很少应用。最初应用过程计算机的15年,其主要特征是控制集中在一台计算机上,常常需要平行的模拟备用系统和后备计算机以提高可靠性。

微型计算机的应用

便宜的微处理器于1971年问世。因为它们可以与半导体存储器 and 输入/输出装置一起装配成微型计算机,因而有可能把过程控制的任务分散到若干台计算机身上。过程控制系统的新结构随之诞生,它的特征就是集散化。1975年出现用前馈和反馈方法控制8到16个回路并有监督功能的微型计算机,它们马上开始代替模拟装置和小型计算机执行低级的控制功能。新的发展正在继续,微型计算机将对测量和控制技术产生重大的影响。

数字控制系统

数字计算机中的信息处理过程同常规的模拟控制或用二进制元件构成的前馈控制完全不同,它不局限于少数有限的几种功能。它有可编的程序,能执行复杂的计算。因而数字过程控制可以开发许多新的方法,低级的数字过程控制可用程序化的算法实现,高级的数字过程控制则用特殊的程序解决问题。由于各级中的控制手段都是广义的前馈和反馈控制,所以必须使设计、选择、整定多级控制算法与过程相匹配。

本书研究过程控制中执行最低级任务的数字控制。但是我们讲述的设计算法,求取过程模型,状态和参数估计,噪声滤波和执行机构控制等很多方法也同样可以应用到数字信息的监督、最优化及协调系统的综合中。

内容

本书论述应用过程计算机和微型计算机的数字控制系统设计。以A篇过程和过程计算机开始。在第二章阐明数字控制系统的一般信号流程及设计数字控制系统的几个步骤。第三章接着简单地介绍线性离散时间系统的数学处理。同时讨论在离散时间信号域内求取过程数学模型的方法和处理技术的基本类型。

其他的课题排列如下:

B篇: 确定性扰动的控制系统

C篇: 随机扰动的控制系统

D篇: 多回路控制系统

E篇: 多变量控制系统

F篇: 基于过程识别的自适应控制系统

G篇: 用过程计算机和微型计算机的数字控制

图1.2用关键词概述了各章所论述的课题。从这个概括图和第二章也可看出进行数字控制系统设计的基本方法。

本书中使用的过程和信号模型主要是参数型, 藉助差分方程或向量差分方程表示, 因为现代的综合程序都是以这些模型为基础。过程本身借助少数几个参数进行简洁的描述, 通过少量的计算求得时域的综合方法并根据这些方法提出结构最优的调节器。这些模型是参数估计法的直接结果, 在状态观测器和状态估计器中可直接应用。表格形式的非参数模型如传递函数或频率响应就没有这样的优点。它们限制了综合的可能性, 特别是用计算机辅助设计和自适应控制算法。

第四章概括论述为确定性扰动和随机扰动所设计的控制算法, 特别如图4.3和12.1节。

第五章按照常规的模拟调节器讨论参数最优化的控制算法的推导和设计, 这种算法有P, PI, PID特性, 且和普通的低阶离散时间调节器一样已与连续信号分离。根据各种仿真所得的结果及有关文献汇编了给定调节器参数的准则并提出一些新的建议。也提示一下计算机辅助设计的线索。

第七章阐述的临界阻尼调节器其显著的特点是综合工作量小。改进的高阶临界阻尼调节器在自适应控制中特别重要。

第八章探讨状态调节器和状态观测器的设计。和其他课题一样, 研究在外部存在连续扰动情况下的设计, 并说明设计作一定的修正就可应用于计算机。这种设计方法是基于二次型性能指标的极小值和极点配置。

第九章讨论时间滞后很大的过程控制包括预估调节器等问题。

由于控制系统设计中几乎必须考虑过程特性的改变, 第十章研究各种控制算法的灵敏度, 并提出降低灵敏度的建议。第11章详细比较为确定性信号设计的几种最重要的控制算法。比较所获得的闭环零极点、控制性能和计算工作量。接着提出控制算法的选择原则。第12章简单介绍离散时间随机信号的数学模型之后, 第13章阐述参数最优控制算法在随机扰动信号影响之下最优参数的给定和其他论题。第14章推导和分析按照参数型随机过程和信号模型设计的最小方差调节器。记住推导特定参数型的改进的最小方差调节器是为了应用于自适应控制。第15章介绍随机扰动的状态调节器并包括状态估计的推导。第16章和第17章应用几个例子说明多回路控制系统的设计, 第16章是串级控制系统, 第17章是前馈控制系统, 前馈控制算法的各种设计方法例如通过参数最优化或按照最小方差原理都是反馈控制算法设计的补充。第18章的多变量过程结构在多变量控制系统控制算法的设计中极为重要, 探讨多变量系统的传递函数和状态表达法。第19章的多变量控制系统设计应用参数最优控制算法研究主调节器, 耦合调节器(加强耦合作用或者是解耦作用), 稳定域, 主调节器之间的相互影响和两变量控制系统的整定法则。第20章根据矩阵多项式表达法可以设计多变量临界阻尼和最

小方差调节器。第21章,应用状态调节器的多变量控制系统设计包括多变量极点配置,矩阵黎卡提、解耦和最小方差状态调节器。

第22章到25章的自适应控制算法是本书的关键部分。在第22章简要总结之后第23章应用递推参数估计算法论述动态过程和随机信号在线识别的各种方法并进行比较。第24章讨论有扰动信号和没有扰动信号时闭环的参数估计。最后第25章通过适当组合参数估计法和调节器设计方法提出各种参数自适应控制系统。所需的设计工作量比较小并满足闭环识别条件的那些控制算法如临界阻尼调节器和最小方差调节器特别适宜。各种参数自适应控制算法都被编成程序在模拟仿真过程和实验过程中进行过在线试验和比较。几个例子都证明这些数字自适应控制算法收敛很快,控制质量很好。参数自适应控制的原理也推广到自适应前馈控制和自适应多变量控制。第26章研究由于幅值整量化和圆整误差引起的非线性以及由它们产生的某些结果,如数字反馈控制系统的极限环和余差,数字前馈控制系统和滤波器中的死区。第27章阐述扰动信号的模拟和数字滤波。研究离散高通和低通滤波器和递推平均。第28章阐明执行机构各种前馈和反馈控制方法。第29章扼要介绍控制算法计算机辅助设计(c. a. d)的程序。

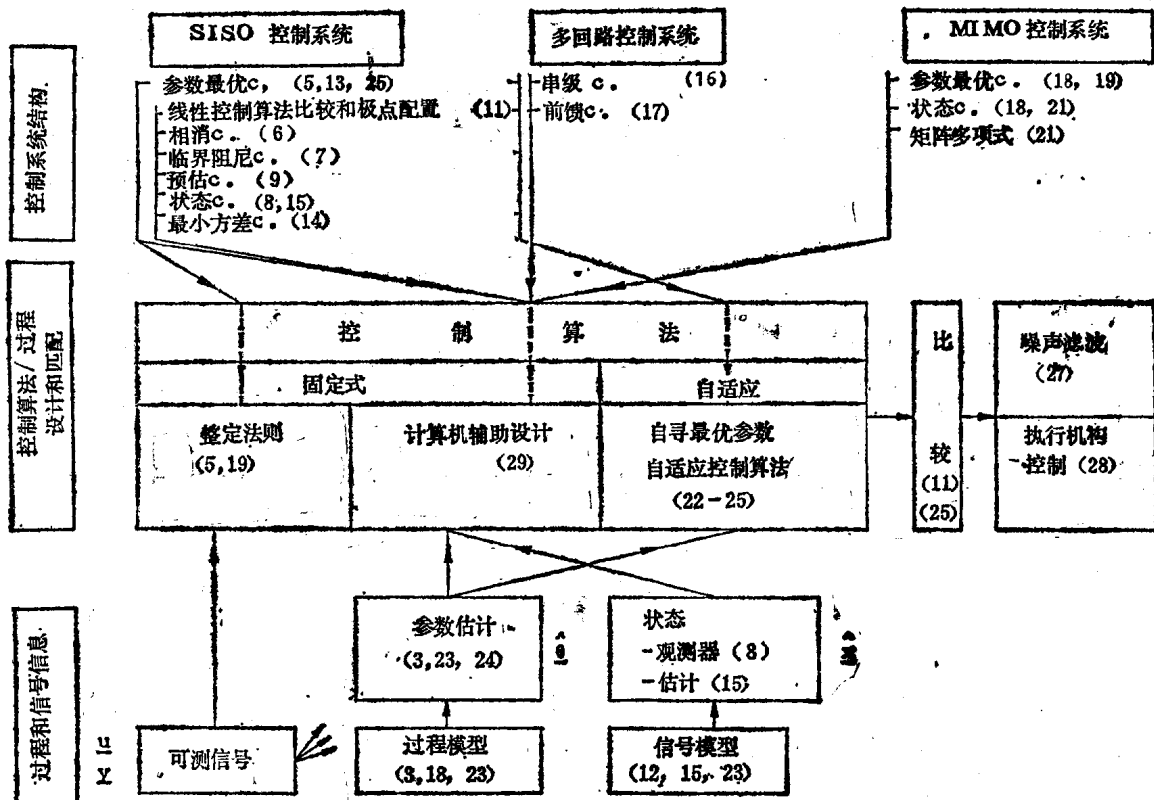


图 1.2 所讨论控制系统的结构, 它们所使用的过程和信号的信息, 过程和控制系统的匹配的概括图
() 所在章节号; C: 控制系统 (参看第 2 章)。SISO 单输入/单输出 MIMO 多输入/多输出

在最后一章讨论几个实例。表明过程识别和控制算法计算机辅助设计在热交换器和回转干燥器中的应用。最后, 两种基本方法, 即过程识别/计算机辅助设计和参数自适应控制分别应用于一个仿真的蒸汽锅炉并进行了比较。

A 过程和过程计算机

2. 数字计算机控制（过程计算机、微处理机）

采样数据控制

用过程计算机实现的数据处理，信号是被采样和数字化的，成了离散的（不连续的）信号，如图2.1所示，这些信号的幅值和时间都是整量化的。

这些具有离散幅值和离散时间的信号，和连续信号不同。它呈现为一系列被调制的脉冲，脉冲的高度与连续信号值成比例。并用整量化的方法把这些脉冲的高度进行整量化。

采样通常是由多路调制器按采样时间间隔 T_0 周期性进行的。多路调制器是与有效范围选择器和模/数转换器组合在一起的。输入数据在数字化后，送到中央处理单元，在中央处理单元经过计算程序的计算，算出输出数据。如果执行机构需要模拟信号，输出数据还要通过具有保持器的数/模转换器，转换成模拟信号。图2.2为采样方框图。

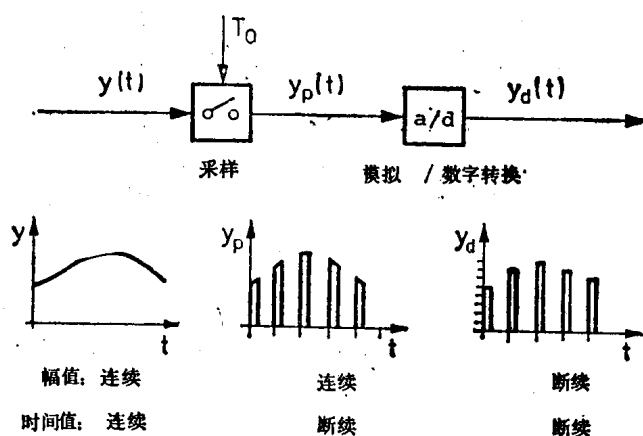


图 2.1 由采样和模/数转换所产生的一个幅值调制、时间离散和幅值离散的信号

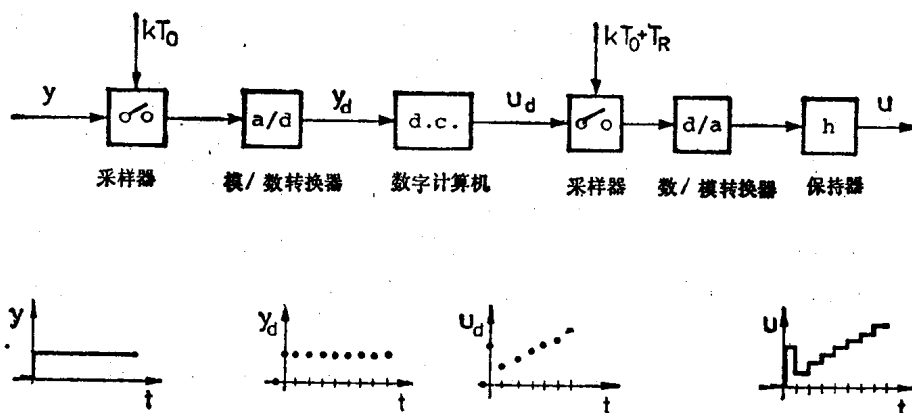


图 2.2 作为采样数据控制器的过程计算机

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

输入信号采样器并不与输出信号采样器同步运行，而是位移了一个时间间隔 T_R 。这一间隙是由模/数转换器和在中央处理单元进行数据处理时造成的。由于这一间隙与执行器、工艺过程和传感器的时间常数比较起来，通常是很小的，因此，通常可以忽略不计。所以，可以把过程计算机的输入和输出采样看作是同步的。此外，对于字长为16位或更长的计算机和最少为10位的模/数转换器信号被整量化掉的部分是很小的，以至于信号幅值也可以认为是连续的。

这些简化使我们得到图2.3的方框图，该图所示的是一个具有过程计算机的控制回路，在这个控制回路中，过程计算机用作采样数据控制器。现在采样器同步运行，并产生离散时间信号。操作变量 u 是由控制算法藉控制变量 y 和参考值 w 作为输入而计算出来的。这样，采样数据控制回路不仅与过程计算机同时存在，采样数据还出现在：

被测变量仅在一瞬间存在（例如：旋转的雷达天线、雷达测距、气相色谱、实验室分析物质的取样、社会经济学的、生物学的及冶金学的数据）；

花钱多的多路传输设备（电缆、通道）。

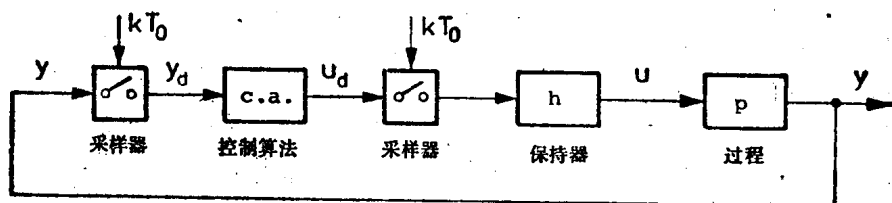


图 2.3 具有作为采样数据控制器的计算机的控制回路

数字控制系统的设计

鉴于技术上和经济上的原因，使用电动、气动或液动模拟控制器组成控制系统的设计，基本上限于比例、积分或微分作用的单目标系统。所以，控制系统合成的可能性受到高度的限制。然而，这些限制对于过程计算机中的控制算法是不起作用的。由于程序的高度灵活性，可以方便地实现各种复杂的控制算法。这样，使得实际应用现代控制理论成为可能。但也产生了新的问题，诸如什么控制算法适用于什么应用目的的问题。只有在下列情况下才有可能回答这一问题，即充分了解过程的数学模型的形式及它们的信号，知道如何区别各种控制算法在控制性能、操作效果、灵敏度、干扰信号、设计效果、程序计算效果以及过程特性（线性、非线性、零极点位置、死时、多变量过程结构）等方面的差异。

有关采样数字系统的理论有大量的资料，在许多控制工程的书籍中，都有一些章节讲述数字采样控制。一些关于数字采样系统的专门书籍，首先基于一些不同问题的讨论〔2.1〕、〔2.2〕，然后是 z 变换的应用〔2.3〕至〔2.13〕、〔2.15〕、〔2.20〕，最后，介绍状态表示法〔2.14〕、〔2.17〕、〔2.18〕、〔2.19〕、〔2.21〕。参考文献中的大量文献都可以列入此处。较多的应用性书籍论述过程计算机控制〔1.7〕~〔1.11〕，仅仅讲述离散化了的模拟PID控制器的那些控制算法。

书中所论述的过程控制系统的设计，考虑以下几个步骤（比较并观察图1.2）。

1. 过程和信号的信息

过程及其信号的有效信息是设计控制系统的基础，这些有效信息可以从以下几个方面获取：

可直接测量的输入、输出、状态变量；

过程模型及信号模型；

过程和信号的状态估计。

过程和信号的模型可以通过识别和参数估计的方法获得，过程模型也可以通过理论建模法得到。不可测的状态变量可以用观测器或状态估计器重新构成。

2. 控制系统的结构

当控制系统结构取决于过程时，在选择了适当的操作变量和被控变量后，控制系统的结构便可设计成如下的形式，例如：

单输入/单输出控制系统；

相关控制系统；

多输入/多输出控制系统。

3. 前馈和反馈控制算法（设计和调整）

最后，前馈和反馈算法可用于过程的设计和和调整，它可以用，

简单参数整定规则；

计算机辅助设计；

自寻最优的自适应算法。

由于几种各具特点的控制算法通常都能用，所以，必须对它们进行一番比较，按照不同的观点进行适当选择。

4. 噪声的滤波

污染被控变量的高频噪声，由于它本身不能控制，所以，必须用模拟或数字滤波器将它滤除。

5. 执行器的前馈或反馈控制

执行器采用前馈控制还是反馈控制，取决于执行器的结构。该过程的控制算法必须调整至执行器控制。

最后，对于所有的控制算法和滤波算法，幅值量化的影响必须考虑进去。图 2.4 是数字

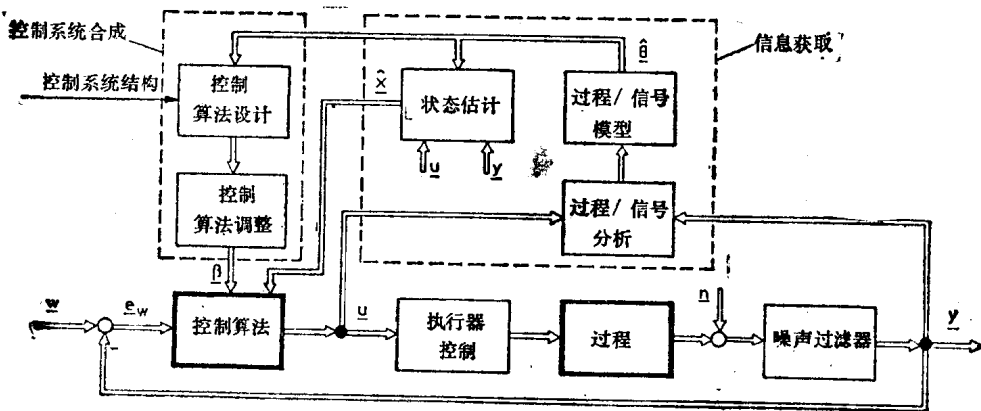


图 2.4 数字控制系统设计图

控制系统的方案图。如果把整定规则应用于简单的参数最优化控制算法的调整，那么，简单过程模型就已经足够了。对于一个单一的计算机辅助设计，需要精确的过程/信号模型，而获得它们的最好办法是用识别和参数估计。如果获取信息和控制算法设计能不断地（在线、实时）进行，那么，自寻最优的自适应控制系统是能够实现的。

3. 离散时间系统

在这一章中, 简要论述线性离散时间系统(数据采集系统)的数学处理。虽然, 仅仅介绍一些基本关系, 但它们是设计数字控制系统的基础。如果读者要深入研究离散时间系统的理论, 可参阅那些著名的教科书, 如[2.3]、[2.4]、[2.10]~[2.14]、[2.17]、[2.18]。

3.1 离散时间信号

3.1.1 离散时间函数 差分方程

离散(不连续)信号是在幅值或时间上取离散值的。与连续信号的不同点在于连续信号在任一瞬间都对应于一幅值, 而离散信号仅包含离散时间点上的离散幅值。下面仅对离散时间信号进行讨论。离散时间信号是由一系列在一定时间点上的脉冲组成, 通常它通过以固定的时间间隔对连续信号进行采样而获得。信号脉冲系列可用几种方法调制而形成, 而且脉冲幅度、脉冲宽度和脉冲频率调制都是不同的。对于数字控制系统来说, 脉冲幅度调制通常是间歇的, 尤其是脉冲的高度与连续信号值成比例、脉冲宽度不变及脉冲仅在等距采样的瞬间产生时, 见图3.1.1。由于应用叠加原理, 在处理线性动态系统时, 这类离散系统导出线性关系。从图3.1.1可以看出, 离散时间幅值调制的脉冲系列, 是由一个开关周期地检测连续信号 $x(t)$ 而产生的, 开关采样时间 T_0 , 关闭时间为 h 。如果开关关闭持续时间 h 与采样周期 T_0 相比非常小, 以及如果开关后面连接一个时间常数 $T_i \gg h$ 的线性传送元件, 那么, 脉冲系列 $x_p(t)$ 可以用离散时间信号 $x_r(kT_0)$ 代表, 如图3.1.2所示。这时 $x_r(kT_0)$ 即为采样瞬间的幅值, 而开关就是一个采样器, 由采样周期 T_0 , 通过对连续函数 $x(t)$ 等距离采样所产生的幅值调制离散时间的函数 $x_r(t)$ 定义为

$$\begin{aligned} x_r(t) &= x(kT_0) & t &= kT_0 \\ x_r(t) &= 0 & kT_0 < t < (k+1)T_0 \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} & \\ & \end{aligned} \right\} k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1-1)$$

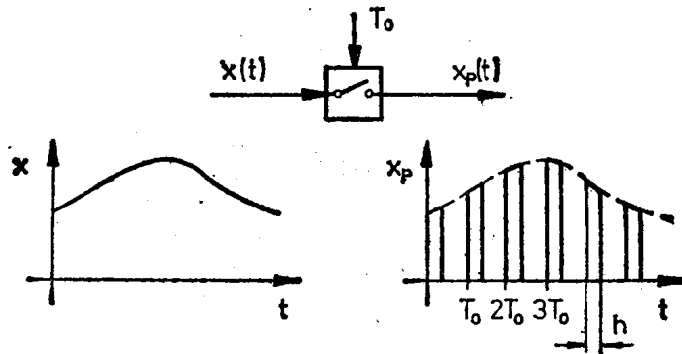


图 3.1.1 用一个关闭时间为 h 和采样周期为 T_0 的开关产生幅值调制离散时间的信号