



PEARSON
Prentice
Hall

离散时间控制系统

(原书第2版)

Discrete-Time Control Systems

(Second Edition)

Katsuhiko Ogata 著
明尼苏达大学

陈杰 蔡涛 张娟 等译

Second Edition

Discrete-Time Control Systems

Katsuhiko Ogata



机械工业出版社
China Machine Press

离散时间控制系统

(原书第2版)

Discrete-Time Control Systems (Second Edition)

Katsuhiko Ogata 著
明尼苏达大学

陈杰 蔡涛 张娟 等译



机械工业出版社
China Machine Press

本书全面系统地介绍了离散时间控制系统的基本概念、基础理论以及分析和设计方法,特别是通过状态空间法和多项式方程法对带有最小阶观测器的极点配置设计进行了深入详细的分析。书中着重于对概念的描述与释义,对于数学公式的详细证明进行了必要的简化,更贴近实际应用。本书还结合 MATLAB 对离散时间控制系统的分析与设计进行研究,提供了大量的 MATLAB 计算实例。另外,每章后都安排了大量的例题和习题,便于读者掌握书中内容。

本书内容编排由浅入深、层次清晰、论述严谨,可作为高等院校自动控制或自动化专业本科生和研究生的教学用书,也适合相关技术领域的工程技术人员,特别是从事计算机控制系统设计的工程技术人员参考。

Simplified Chinese edition copyright © 2006 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Discrete-Time Control Systems, Second Edition* (ISBN 0-13-034281-5) by Katsuhiko Ogata, Copyright © 1995, 1987.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2004-5165

图书在版编目(CIP)数据

离散时间控制系统(原书第2版)/尾形克彦(Ogata, K.)著;陈杰等译. -北京:机械工业出版社,2006.5

书名原文:Discrete-Time Control Systems, Second Edition

ISBN 7-111-18566-8

I. 离… II. ①尾…②陈… III. 离散控制-控制系统 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 017268 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:陆颖 迟振春

北京京北制版印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·36 印张

定价:68.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换

本社购书热线:(010) 68326294

译者序

本书作者尾形克彦(国内曾译为绪方胜彦)著有《现代控制工程》、《系统动力学》^①等书。他的主要研究方向为现代控制工程,包括复杂系统的最优控制、数学建模和离散时间控制系统的开发设计技术等。

经过几十年的发展,控制科学领域的理论和技术得到了极大的丰富和提高。与此同时,离散时间控制领域的技术也发展很快,伴随着处理器和计算机技术水平的突飞猛进,离散时间控制系统已经得到了广泛而深入的应用。在此基础上,作者于1995年适时推出了本书第2版,对其第1版内容进行了较大幅度的修改、调整与完善,并将最新研究成果引入本书。我们现将其译成中文奉献给广大读者。

本书全面系统地介绍了离散时间控制系统的基本概念、基础理论以及分析和设计方法,其主要特点如下:

1. 从基础理论到方法对离散时间控制系统设计进行了系统的描述,特别是通过状态空间法和多项式方程法对带有最小阶观测器的极点配置设计进行了深入详细的分析。

2. 结合MATLAB对离散时间控制系统的分析与设计进行研究,提供了大量的MATLAB计算实例。

3. 在写作上兼顾了具备不同基础的读者,内容编排切合读者理解的需要,由浅入深、层次清晰、结构严谨、语言流畅。

4. 每章后都安排了大量的例题和习题,以便于读者掌握书中内容。

本书可作为自动控制或自动化专业本科生和研究生的教学用书,也适合作为相关技术领域的工程技术人员,特别是从事计算机控制系统设计的工程技术人员的参考用书。书中着重于对概念的描述与释义,对于数学公式的详细证明进行了必要的简化,更贴近于实际应用。在学习本书之前,应掌握经典控制和现代控制理论的基本知识。

本书翻译工作由北京理工大学自动控制系的陈杰、蔡涛和张娟等人完成。其中,第1、2章由陈杰翻译,第4、6章和前言、附录由蔡涛翻译,第3、5、7、8章由张娟翻译,全书最后由陈杰、蔡涛完成统稿。窦丽华教授详细校阅了全部译稿并提出了许多宝贵意见,对本书最后定稿帮助很大,在此表示衷心感谢。另外,还要感谢范瑞霞教授、黄鸿副教授、彭志红副教授及白永强、陈文颖和潘峰老师在翻译过程中给予的诸多帮助。书中专业术语和外国人名的翻译主要参考全国自然科学名词审定委员会1990年公布的《自动化名词》、中国大百科全书出版社1991年出版的《中国大百科全书——自动控制与系统工程卷》以及高等教育出版社1979年出版的《数学手册》。由于译者水平有限,而且时间仓促,书中一定存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

译者

2005年9月

① 该书已由机械工业出版社引进出版。——编辑注

前 言

本书全面介绍了离散时间控制系统的分析和设计方法,可作为高等院校理工科四年级本科生和一年级研究生的离散时间控制系统或计算机控制系统课程教材。

此次再版时对原有内容进行了增删修改,第2版中最显著的特点是大大丰富了利用最小阶观测器的极点配置设计内容,分别在第6章和第7章介绍了状态空间方法和多项式方程法。

为便于读者学习,本书包含了为理解各个主题所需的全部内容。例如,在介绍极点配置和观测器设计时,包含了定理的证明和重要公式的推导步骤。

本书详细介绍了控制系统设计的基础理论。读者理解这些背景知识后,就可以利用MATLAB来求解涉及多种向量-矩阵运算的数值解。这里假定读者已熟悉我的另一本书的内容(书名为《Solving Control Engineering Problems with MATLAB》,由Prentice Hall出版),或者学习过其他书的相同内容。

阅读本书的读者需要修过控制系统导论、常微分方程等课程,并且熟悉MATLAB计算。对于没有MATLAB基础的读者,也可与本书同步学习如何利用MATLAB进行计算。

由于本书着眼于工程技术人员,所以书中着重介绍相关的基本概念,避免展开高深的数学讨论,全书按照离散时间控制系统理论循序渐进展开。

本书内容分为8章,另有3个附录。全书内容概括如下:

第1章是离散时间控制系统绪论;第2章讲述在离散时间控制系统研究中必需的 z 变换理论;第3章讨论离散时间系统的 z 平面分析的有关内容,包括冲激采样、数据保持、采样定理、脉冲传递函数和数字滤波器等;第4章讲述如何利用传统方法进行离散时间控制系统设计,包括闭环系统在 z 平面内的稳定性分析,暂态和稳态响应分析,基于根轨迹法、频率响应法和解析法的系统设计过程。

第5章介绍状态空间分析的有关内容,包括离散时间系统的状态空间方程的表示、脉冲传递函数矩阵、离散化方法和李雅普诺夫(Liapunov)稳定性分析;第6章讨论极点配置和观测器设计,包括可控性、可观测性、极点配置、状态观测器和伺服系统等内容;第7章讲述控制系统设计的多项式方程法,首先介绍丢番图方程,然后讨论利用多项式方程法来进行控制系统的设计,最后介绍利用多项式方程法进行模型匹配控制系统的设计;第8章讨论有限阶和无限阶二次型最优控制问题,并给出基于二次型最优控制问题的MATLAB设计仿真。

附录A简要概括向量-矩阵分析内容,附录B给出第2章 z 变换理论中没有包含的一些有用定理,如反演积分法和改进的 z 变换法,附录C讨论当控制信号为向量时的极点配置设计问题。

为便于读者更好地理解书中内容,全书精心编写了丰富的示例。另外,除第1章外,每章结束部分都集中安排了大量A类例题和B类习题,建议读者认真学习这些例题和习题。其中,例题有题解,习题则不提供答案,可以作为课后作业或测验试题。

本书的大部分内容已经通过明尼苏达大学本科毕业班和一年级研究生控制系统课程的实践检验。

本教材一般用于两学期的课程。作为讲座形式的课程,教师可以灵活地选择讲授内容;在一个学期的课程中,最好讲授前六章。本书还可以作为从事实际工作的工程师学习离散时间控制理论的自学用书。

非常感谢我的学生,他们不仅完成了所有例题、习题以及例题的解答,而且对书中内容提出了许多建议。

尾形克彦

目 录

译者序
前言

第 1 章 离散时间控制系统绪论	1
1.1 引言	1
1.2 数字控制系统	3
1.3 量化和量化误差	5
1.4 数据采集、转换和分配系统	7
1.5 小结	13
第 2 章 z 变换	16
2.1 引言	16
2.2 z 变换	16
2.3 初等函数的 z 变换	17
2.4 z 变换的重要性质和定理	21
2.5 z 反变换	27
2.6 利用 z 变换法解差分方程	38
2.7 小结	40
例题与解答	40
习题	52
第 3 章 离散时间控制系统的 z 平面 分析	55
3.1 引言	55
3.2 冲激采样和数据保持	55
3.3 求解 z 变换的卷积积分法	61
3.4 由采样信号还原连续信号	67
3.5 脉冲传递函数	74
3.6 数字控制器与数字滤波器的实现	90
例题与解答	103
习题	124
第 4 章 离散时间控制系统的传统 设计方法	129
4.1 引言	129
4.2 s 平面到 z 平面的映射	129
4.3 z 平面内闭环系统的稳定性分析	137
4.4 暂态和稳态响应分析	144
4.5 根轨迹设计法	153

4.6 频率响应设计法	168
4.7 解析设计法	181
例题与解答	191
习题	214
第 5 章 状态空间分析	218
5.1 引言	218
5.2 离散时间系统的状态空间表示法	220
5.3 离散时间状态空间方程的求解	225
5.4 脉冲传递函数矩阵	232
5.5 连续时间状态空间方程的离散化	233
5.6 李雅普诺夫稳定性分析	241
例题与解答	252
习题	279
第 6 章 极点配置和观测器设计	284
6.1 引言	284
6.2 可控性	285
6.3 可观测性	292
6.4 状态空间分析和设计中的有用变换	298
6.5 极点配置设计	303
6.6 状态观测器	319
6.7 伺服系统	350
例题与解答	362
习题	392
第 7 章 控制系统设计的多项式 方程法	398
7.1 引言	398
7.2 丢番图方程	398
7.3 示例	402
7.4 控制系统设计的多项式方程法	404
7.5 模型匹配控制系统的设计	410
例题与解答	416
习题	434
第 8 章 二次型最优控制系统	437
8.1 引言	437
8.2 二次型最优控制	439
8.3 稳态二次型最优控制	453
8.4 伺服系统的二次型最优控制	460

例题与解答	471	附录 B z 变换理论	526
习题	487	B.1 引言	526
附录 A 向量-矩阵分析	490	B.2 z 变换理论的有用定理	526
A.1 定义	490	B.3 z 反变换和反演积分法	529
A.2 行列式	490	B.4 改进的 z 变换法	533
A.3 逆矩阵	491	例题与解答	537
A.4 矩阵运算规则	493	附录 C 向量控制中的极点配置设计 ...	543
A.5 向量与向量分析	497	C.1 引言	543
A.6 特征值、特征向量和相似变换	500	C.2 初步讨论	543
A.7 二次型	508	C.3 极点配置设计	545
A.8 伪逆	511	例题与解答	554
例题与解答	513	参考文献	565

第 1 章 离散时间控制系统绪论

1.1 引言

近年来,数字控制器在控制系统中的使用呈现快速增长的趋势。数字控制通常用于获得最优系统性能,如最高的生产效率、最大的效益、最低的成本或最小的能耗等等。

近来,计算机控制的应用使得一些事件,如工业机器人的“智能”运动,汽车燃料节省的最优化,家用电器和设备(比如微波炉、缝纫机)工作性能的改善等等成为可能。数字控制系统的主要优点在于控制程序的决策性能和灵活性。

动态系统的控制趋向于数字控制方式而非模拟控制方式,其主要原因归结于低成本数字计算机的涌现,以及它们采用的数字信号具有连续时间信号无法比拟的优点。

信号类型 连续时间信号是定义在连续时间区间上的信号,其幅值连续或仅有有限个孤立值,用一组孤立的数值来表示某个变量的过程叫做量化(quantization)。量化产生的孤立数值就叫做量化值,量化后的变量呈现阶梯形曲线。

模拟信号定义在连续时间范围内,其幅值变化也是连续的。图 1-1a 所示为连续时间模拟信号,图 1-1b 所示为连续时间量化后的信号(仅为幅值量化)。

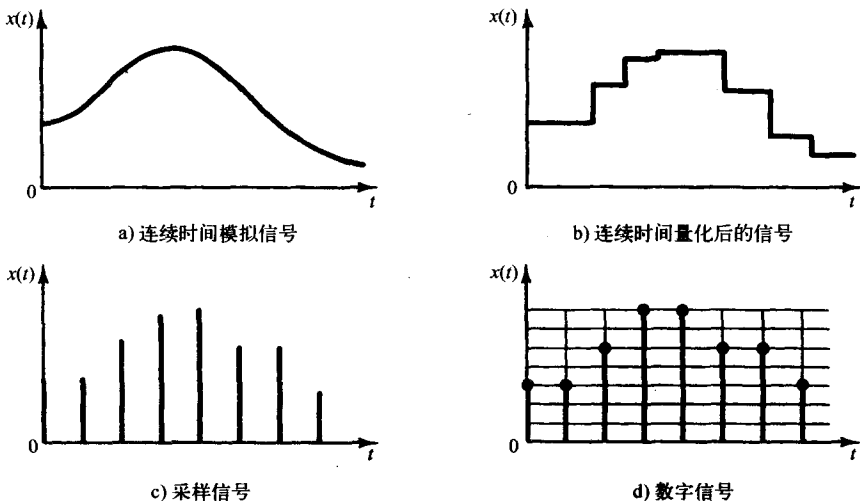


图 1-1 信号类型

模拟信号是连续时间信号的特例,实际上,我们经常使用术语“连续时间”来代替“模拟”。尽管严格来说术语“连续时间信号”和“模拟信号”并不完全同义,但在包括本书的文献中,二者仍经常相互替代。

离散时间信号仅定义在离散的时间点上(即时间变量 t 被量化)。在一个离散时间信号中,如果幅值包络呈现出近似连续的变化,则该信号称为采样信号。采样信号可以通过对模

拟信号在离散时间点进行采样来产生,它是一种幅值调制脉冲信号。图 1-1c 所示为采样信号。

数字信号是具有量化幅值的离散时间信号。这种信号可以由一个数字序列来表示,例如二进制形式的数字序列。实际上,许多数字信号是通过模拟信号进行采样量化后得到的,量化使得模拟信号转换成有限位的二进制数,从而可被方便读取。图 1-1d 所示为数字信号。显然,该信号的幅值和时间都经过了量化,适用于数字控制器。而数字控制器在使用中要求对信号幅值和时间均实现量化。

术语“离散时间信号”包含的内容比“数字信号”或“采样信号”要多。事实上,离散时间信号既可以是数字信号也可以是采样信号。在实际应用中,术语“离散时间”和“数字”经常互换。但是,在理论研究中,术语“离散时间”用得较多,而“数字”则较多地应用于与硬件或软件相关的实现中。

在控制工程中,被控对象是设备或过程,可以是实际设备或过程,也可以是无形过程,如经济过程。大多数设备和过程都涉及连续时间信号,因此,如果控制系统中采用了数字控制器,则必须采用信号转换(模数转换和数模转换)方法。本书将在 1.4 节讨论这种信号转换方法。

粗略地讲,离散时间控制系统、采样数据控制系统和数字控制系统这几个术语的含义是相同或非常类似的。但严格地说,这些系统当然是有所差别的。例如,在采样控制系统中既有连续时间信号又有离散时间信号,其中离散时间信号是调幅脉冲信号;数字控制系统可能也同时包含连续时间信号和离散时间信号,后者采用数字编码格式。采样控制系统和数字控制系统可以统称为离散时间控制系统。

许多工业控制系统都包含连续时间信号、采样信号和数字信号。因此,本书使用“离散时间控制系统”来表示包含采样信号(调幅脉冲信号)或数字信号(数字编码信号)的控制系统。

本书研究的系统 本书讨论的离散时间控制系统绝大多数都是线性定常系统,不过偶尔也会涉及非线性或时变系统。线性系统具有叠加性,即若 y_1 是某系统对输入 x_1 的响应, y_2 是该系统对输入 x_2 的响应,则系统是线性的条件是:当且仅当对任意标量 α 和 β , 输入 $\alpha x_1 + \beta x_2$ 的响应输出为 $\alpha y_1 + \beta y_2$ 。

线性系统可以用线性微分方程或线性差分方程来描述。线性定常系统的微分或差分方程的系数不会随时间而改变,即该系统的特性不会随时间而改变。

离散时间控制系统和连续时间控制系统 有一个或多个变量仅在离散的时刻发生变化,这样的控制系统称为离散时间控制系统。这些时刻用 kT 或 $t_k (k=0, 1, 2, \dots)$ 来表示,用来确定进行实际测量或读取计算机内存数据的时刻。两个离散时刻之间的间隔充分小,从而使得这两个时刻之间的数据可以通过简单插值来近似得到。

离散时间控制系统与连续时间控制系统的区别在于前者的信号是采样或数字形式。如果要在控制系统中采用计算机作为数字控制器,那么所有采样信号都必须转换成数字信号。

连续时间系统的信号在时间上是连续的,可以由微分方程来描述。离散时间系统,既可以包含采样信号、数字信号,也可能包含连续时间信号,在对连续时间信号近似离散化后可以用差分方程来描述。

采样过程 对连续时间信号的采样,就是用离散时刻的序列值来代替原有的连续时间信

号。如果控制系统中采用了数字控制器，采样过程是必不可少的。为了完成信号的输入，必然需要对连续时间信号进行采样和量化。采样过程也会发生在需要间隔时间测量的控制系统中，例如雷达跟踪系统，雷达天线旋转过程中每转一周就会测量一次方位角和俯仰角。因此可以说，雷达搜索过程中产生了采样数据。另一个例子是，为了节省开支，当几个设备采用分时方法共享同一个大型控制器或计算机时，也会形成采样，当周期性地给每个设备发送控制信号时，该信号是采样信号。

采样过程之后通常伴随着量化过程。在量化过程中将采样后的模拟幅值进行数字量化，用二进制数表示后才可被计算机处理。计算机输出的是采样信号，送到保持电路后输出变成连续时间信号，然后才传送给执行器。本书 1.4 节中将详细讨论数字控制器中的这种信号处理方法。

尽管术语“离散化”和“采样”意义基本相同，相比之下，“离散化”更经常地应用于多输入多输出系统的分析中。

需要强调，有时候采样和离散化过程是完全虚构的，引入这些概念仅仅是为了简化对只包含连续时间信号的控制系统的分析。事实上，我们经常需要针对连续时间系统建立合适的离散时间模型，例如对连续时间系统的计算机仿真。利用计算机仿真系统进行分析，可以对参数进行整定，优化给定的性能指标。

本书提供的大多数内容适用于解决线性定常离散时间控制系统的设计问题。值得一提的是许多数字控制系统都是基于连续时间控制系统设计方法，因此在连续时间控制器设计中所积累的大量经验，对于离散时间控制器的设计也具有重要价值。

1.2 数字控制系统

图 1-2 为数字控制系统的基本控制结构框图，该系统包括反馈控制和前馈控制。由于控制系统的性能好坏评价标准不是绝对的，所以在设计该系统时，应根据实际情况选择适当的性能指标，并在控制器设计中对选择的性能指标予以优化。

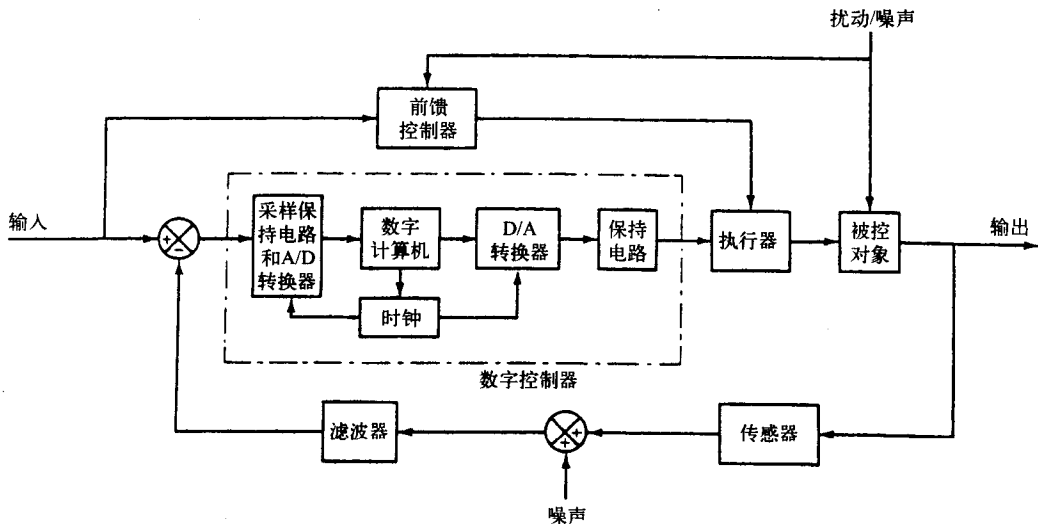


图 1-2 数字控制系统框图

数字控制系统中的信号形式 图 1-3 所示为数字控制系统的框图, 系统的基本单元用方框表示。控制器的运行是由时钟控制的。如图所示, 在该数字控制系统中, 某些环节传输的是不同幅值的连续时间信号或离散时间信号, 而其他环节中则只传输数字编码信号。

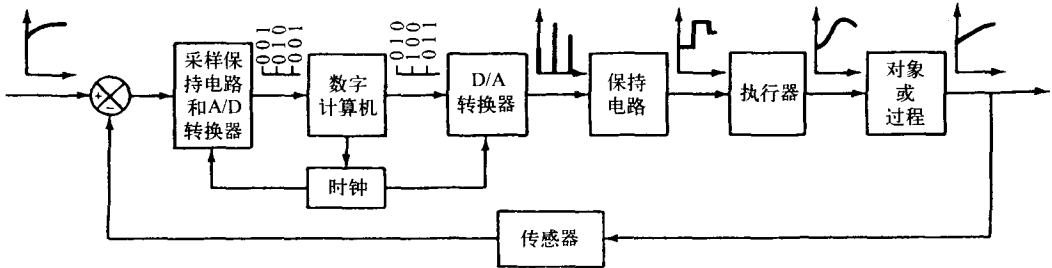


图 1-3 数字控制系统的框图(图中信号以二进制或图形表示)

图中对象的输出是连续时间信号。误差信号通过采样保持电路和模数转换器转换成数字形式, 采样的同时也完成信号转换。计算机采用某种算法对数字序列进行处理, 而后产生新的数字序列。每个采样时刻都必然有编码数字(通常是 8 位或更多位的二进制数)被转换成实际的控制信号, 该控制信号通常是连续时间信号或模拟信号。数模转换器和保持电路将数字编码形式的数字序列转换为分段连续时间信号。以上过程均由计算机内的实时时钟来进行同步。保持电路输出的连续时间信号, 直接或通过执行器间接作用于对象, 来控制其动态性能。

将连续时间信号转换为离散时间信号的操作叫做采样或离散化。反之, 将离散时间信号转换为连续时间信号的操作, 叫做数据保持。数据保持将一组离散时间数据重构成连续时间信号, 通常用外推法实现。在很多情况下, 数据保持是通过保持相邻采样点间的信号幅值恒定来实现的(本书将在 1.4 节讨论外推法)。

采样保持(S/H)电路和模数转换器(A/D)将连续时间信号转换成一组二进制数, 该模数转换过程叫做编码。采样保持电路和模数转换器的结合可以形象地用一个开关来表示, 每隔时间 T 就瞬时闭合一次, 并输出编码数字序列。计算机对该数字序列进行运算后输出期望的数字序列。相反, 数模转换的过程叫做解码。

术语定义 在详细讨论数字控制系统之前, 对图 1-3 框图中的术语给出定义如下:

采样保持(S/H)。“采样保持”是所有采样保持放大器的统称, 用于描述某种电路, 该电路输入模拟信号, 并可在规定时间内保持此输入信号为恒定值。采样保持器的输入信号通常是电信号, 不过也可能为其他形式, 例如光信号或机械信号。

模数转换器(A/D)。模数转换器也叫编码器, 是一种可将模拟信号转换成数字信号的装置, 输出信号通常是数字编码形式。在模拟部件与数字部件之间必须采用此转换器作为接口。市场上的 A/D 转换器往往集成了采样保持电路。由模拟信号转换成相应的数字信号(二进制数)是一个逼近过程, 这是由于模拟信号可以细分为无限个值, 而对于数字信号, 有限位数决定了只有有限个不同的取值, 这个逼近过程就叫做量化(有关量化的更多内容将在 1.3 节中介绍)。

数模转换器(D/A)。数模转换器也叫解码器, 是一种将数字信号(编码数字)转换成模拟信号的装置。在数字部件与模拟部件之间必须采用此转换器作为接口。

对象或过程。被控对象是指任何被控的实际物体,例如,燃炉、化学反应堆以及可完成特定操作的机械组件(比如伺服系统或宇宙飞船)。

过程通常定义为被控对象的运行或进展,表现为一系列以相对固定方式接连发生的状态改变,并逐渐发展直至某个特定结果或终止状态。本书中将任何被控对象的运行称为过程,比如化学过程、经济过程和生物过程。

设计控制系统时最困难的地方可能就在于对被控对象或过程的精确建模。尽管有许多方法可用来建立对象或过程的模型,但困难仍可能存在,这主要是因为缺乏对过程动力学特性的精确描述,以及在许多实际对象或过程中还存在未恰当定义的随机参数。因此,在设计数字控制器时,有必要认识到,在很多情况下,被控对象或过程的数学模型只是实际对象或过程的近似。只有机电系统和液压系统是例外,因为它们可以被精确建模,例如,对机器人手臂可以建立精度很高的系统模型。

传感器。传感器是可将输入信号转换为另一种形式信号输出的装置,比如将压力信号转换成电压输出的装置。通常,输出信号取决于输入信号的历史信息。

传感器可分为模拟传感器、采样数据传感器和数字传感器三种类型。模拟传感器的输入与输出信号都是连续时间函数,信号的幅值可以是系统实际限制范围内的任何值。采样数据传感器的输入输出信号只在离散瞬时出现(通常是周期性的),但信号幅值与模拟传感器的一样,都是非量化的。数字传感器的输入输出信号仅在离散瞬时出现且信号幅值经过了量化(即幅值只取离散值)。

采样操作类型 如前所述,自变量 t 是离散的信号叫做离散时间信号。采样操作是将连续时间信号转换为离散时间信号的基础。

以下是几种实用的采样类型:

1. 周期采样。在这种情况下,采样时刻是等间距的,即 $t = kT (k = 0, 1, 2, \dots)$ 。周期采样是最普通的采样操作。

2. 多阶采样。在这种情况下, t_k 的取值按照周期性规律重复,即对于所有的 k 值, $t_{k+r} - t_k$ 是恒定值。

3. 多速采样。在多回路的控制系统中,各回路的最大时间常数可能差异较大,因此,在具有最大时间常数的回路中,应当进行慢速采样,而在小时间常数回路中就必须进行快速采样。因此,对数字控制系统中的不同反馈通道可独立选择采样周期,即可以采用多个采样速率。

4. 随机采样。在这种情况下,采样时刻是随机的,或者说, t_k 为随机变量。

本书只讨论周期性采样的情况。

1.3 量化和量化误差

模数转换(A/D转换)包括的主要功能有采样、幅值量化和编码。当采样值落入两个相邻的允许输出状态之间时,应使采样输出为最接近信号真实值的输出状态。将连续或模拟信号用有限个离散状态表示的过程叫做幅值量化。也就是说,“量化”意味着将连续或模拟信号转换为一组离散的状态(注意,当一个物理量用数字来表示时,必然伴随着量化过程)。

每个量化后的采样输出状态都用数字码表示,用数字码(比如二进制码)表示采样值的过程叫做编码或译码。因此,编码是将数字码或字赋给每个离散状态的过程。采样周期和量化

级别将影响数字控制系统的性能,所以必须仔细考虑。

量化 用来处理数字信号的标准数字系统是二进制数字系统。在这种系统中,码组由 n 个非“通”(1)即“断”(0)的脉冲组成。量化时, n 个“通-断”脉冲可以表示 2^n 个幅值电平或输出状态。

量化电平 Q 定义为两个相邻量化点取值之差,即

$$Q = \frac{\text{FSR}}{2^n}$$

其中,FSR 是满量程范围。在二进制原码中最左位具有最大权重(满量程的一半),故称为最高有效位(MSB),最右位具有最小权重(满量程的 $1/2^n$),故称为最低有效位(LSB)。从而有

$$\text{LSB} = \frac{\text{FSR}}{2^n}$$

显然,最低有效位与量化电平 Q 对应相等。

量化误差 由于二进制数字的位数是有限的,所以 A/D 转换器的分辨率也是有限的。也就是说,数字输出只能有有限个可能的电平,因此只能将模拟值转换成误差最小的数字电平。即,任何 A/D 转换器都会有量化误差,误差大小介于 0 和 $\pm Q/2$ 之间。该误差取决于量化电平的精细度,因此可以通过减小量化电平(即增加位数 n)使误差减小到期望值。实际上,位数不可能无限大,所以量化总会有误差存在。在量化过程中存在的不确定性叫做量化噪声。

对于给定的数字控制系统,为确定量化电平的期望值(或输出状态数目),工程师必须很好地理解量化电平值与由其引起的误差之间的关系。由于量化噪声的方差与噪声平均功率成正比,故量化噪声的方差是量化误差的一个重要量度标准。

图 1-4a 所示为量化器框图及其输入-输出特性。对于模拟输入 $x(t)$,输出 $y(t)$ 的可能电平值仅为有限个,这些值为量化电平 Q 的整数倍。

在数值分析中,由于忽略剩余位数而产生的误差叫做舍入误差(round-off error)。由于量化过程是一个逼近过程,在此过程中,模拟量被一个有限数字量近似取代,因此量化误差也是舍入误差。显然,量化电平越精细,舍入误差就越小。

图 1-4b 所示为一个模拟输入 $x(t)$ 和它对应的离散输出 $y(t)$, $y(t)$ 形如阶梯函数。量化误差 $e(t)$ 为输入信号与量化输出之差,即

$$e(t) = x(t) - y(t)$$

量化误差值为

$$0 \leq |e(t)| \leq \frac{1}{2} Q$$

对较小的量化电平 Q ,量化误差的特性与随机噪声很相似。在效果上,量化过程相当于一个随机噪声源。接下来求取量化噪声的方差,该方差可用量化电平 Q 表示。

假设量化电平 Q 很小,并设量化误差 $e(t)$ 是白噪声,在 $-Q/2$ 到 $Q/2$ 之间服从均匀分布(显然这是相当粗略的假设,不过,由于量化误差信号 $e(t)$ 幅值很小,该假设作为一阶近似还是可以接受的)。信号 $e(t)$ 的概率分布 $P(e)$ 如图 1-4c 所示。 $e(t)$ 的平均值为 0,即 $\overline{e(t)} = 0$,进一步可求量化噪声的方差 σ^2 是

$$\sigma^2 = E[e(t) - \overline{e(t)}]^2 = \frac{1}{Q} \int_{-Q/2}^{Q/2} \xi^2 d\xi = \frac{Q^2}{12}$$

因此,若量化电平 Q 比输入信号的平均幅值小,则量化噪声的方差是量化电平平方的 $1/12$ 。

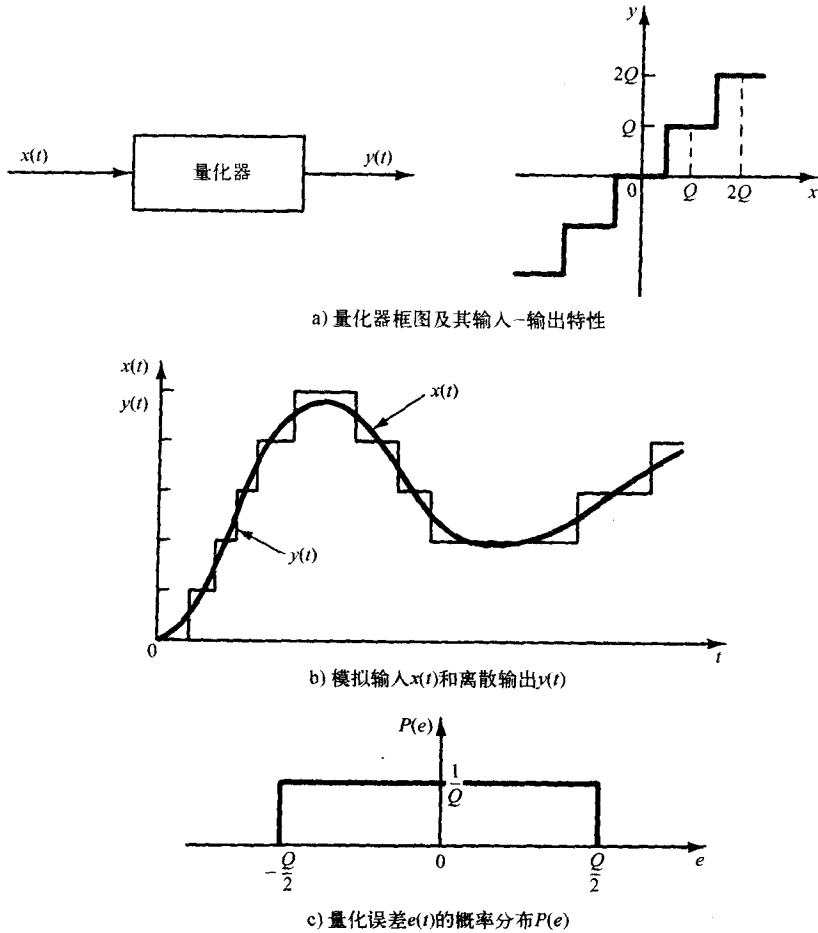


图 1-4

1.4 数据采集、转换和分配系统

随着计算机应用于数字控制领域的快速发展,数据采集系统和分配系统已经成为整个控制系统中的重要部分。

数字控制系统中的信号转换包括以下操作:

1. 多路复用和多路分配。
2. 采样保持。
3. 模数转换(量化和编码)。
4. 数模转换(解码)。

图 1-5a 所示为数据采集系统框图,图 1-5b 所示为数据分配系统框图。

数据采集系统的输入是物理量,如位置、速度、加速度、温度或压力等。这些物理量首先通过适当的传感器转换成电信号,通常是电压或电流信号。一旦该物理量被转换成电压或电流信号后,数据采集过程的其他部分均由电路来完成。

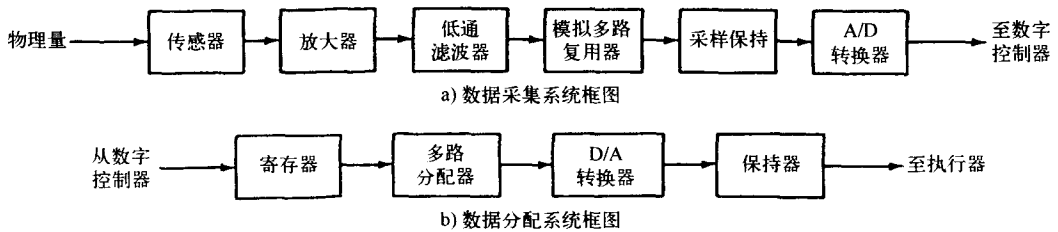


图 1-5

在图 1-5a 中接在传感器后面的放大器,通常是运算放大器。该放大器完成下述的部分或全部功能:对传感器的输出电压进行放大;将电流信号转换为电压信号;对信号进行缓冲。紧跟在放大器之后的低通滤波器则能够削弱信号的高频成分,如信号中的噪声(电子噪声本质上是随机的,可通过低通滤波器来使之减弱。然而,普通电气噪声通常是周期性的,就像电源线干扰,常用陷波滤波器来使之减弱)。低通滤波器的输出是模拟信号,该信号再送入模拟多路复用器,多路复用器的输出再送给采样保持电路,然后依次输出给 A/D 转换器。经过 A/D 转换后的输出是数字信号,最后送到数字控制器。

数据采集的反过程是数据分配过程,如图 1-5b 所示。数据分配系统包括寄存器、多路分配器、数模转换器和保持电路,其功能是将数字信号(二进制)转换成模拟信号。D/A 转换器的输出至保持电路,保持电路再输出给模拟执行器,再由执行器直接控制受控对象。

下面,我们将分别讨论信号处理系统中的各组成部分。

模拟多路复用器 A/D 转换器是数据采集系统中成本最高的部件。模拟多路复用器是使多个模拟通道能够分时共用单个 A/D 转换器的装置。仅用一个数字控制器处理多个通道是可行的,因为输入信号的脉冲宽度都很窄,所以每个采样周期内的空闲时间可供其他信号使用。如果用单个数字控制器处理多路信号时,这些输入信号必须通过模拟多路复用器后再送至控制器。

图 1-6 所示为模拟多路复用器的示意图。模拟多路复用器是一个多路开关(通常是电子开关),可按照规定顺序对多个模拟输入通道进行切换。在实际使用时,通道数常取 4、8 或 16。每个时刻只有一个开关处在“导通”状态,当开关接通某个输入通道后,在特定时段内,该输入信号与多路复用器的输出维持导通,采样保持电路即对信号电压(模拟信号)进行采样

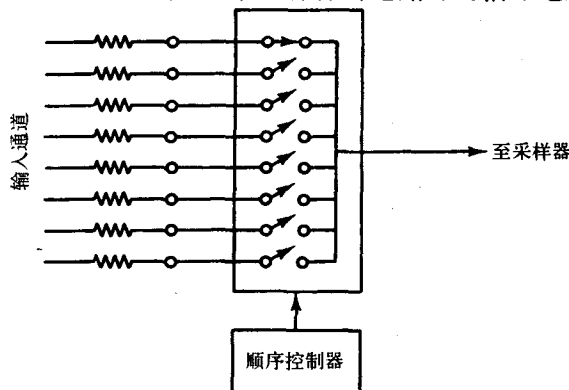


图 1-6 模拟多路复用器的示意图

并保持,与此同时,A/D转换器将模拟值转换成数字量(二进制数)。顺序选通每个通道,则相应的模拟值就按选通顺序转换成数字量。

多路分配器 多路分配器与采样输入信号同步,用于将数字控制器输出的混合数据分配至原先的各通道。每个通道都与一个D/A转换器相连,以此获得通道独立的模拟输出信号。

采样保持电路 数字系统中的采样器将模拟信号转换成调幅脉冲串。保持电路在一段时间内维持采样脉冲信号的数值不变。为得到代表采样时刻输入信号的精确数字,在A/D转换器中必须加入采样保持电路。商业上,一般将采样和保持电路集成为一个单元,叫做采样保持器(S/H)。而数学上采样操作和保持操作是分开建模的(参见3.2节)。实际应用时,通常采用多路复用器,使得多路采样后的模拟信号共享一个A/D转换器。

实际上,采样时间与采样周期 T 相比是非常短的。当采样时间可被忽略时,此时的采样器可视为“理想采样器”。理想采样器可以使采样和保持的数学模型相对简化(3.2节将详细讨论该数学模型)。

图1-7所示为采样保持电路的简图,其中的S/H电路是一种模拟电路(或简单的电压记忆装置),其功能是先获取输入电压,再将其存储在一个高质量电容器中,该电容器具有低泄漏和低介电吸收特性。

在图1-7中电子开关与保持电容器相连。运算放大器1是一个具有高输入阻抗的输入缓冲放大器。运算放大器2是输出放大器,用来缓冲存储在保持电容器上的电压。

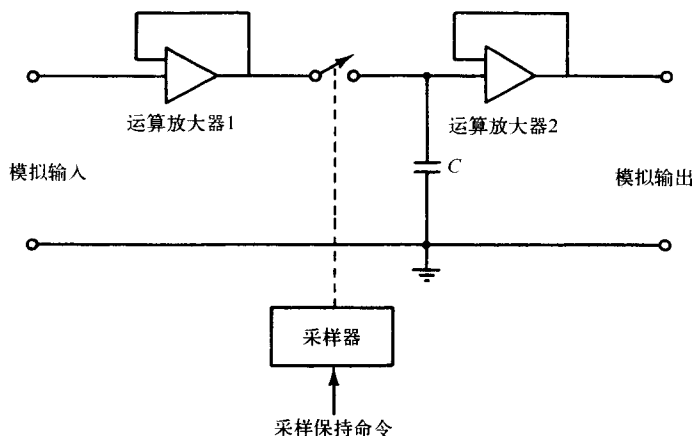


图 1-7 采样保持电路

采样保持电路有两种工作模式:跟踪模式和保持模式。当开关闭合时(即当输入信号接通时),工作模式为跟踪模式,电路中电容器上的电荷跟踪输入电压变化。当开关断开时(即当切断输入信号时),工作模式为保持模式,电容电压在一定时间内维持恒定。图1-8所示为跟踪模式和保持模式。

实际电路从跟踪模式切换到保持模式不可能在瞬间完成。若电路处在跟踪模式时,发出保持命令,则在响应该命令前,电路在一小段时间内仍会维持跟踪模式。开关切换时触点分离和接通间的间隔时间(即测量幅值不确定的那段时间)叫做缝隙时间。

保持模式期间的输出电压可能会缓慢衰减,可以通过引入具有高输入阻抗的输出缓冲放