

Selected Foreign Text Books



外国教材精选

离散时间 控制系统

[日] 绪方胜彦 著
刘君华 等译
万百五 尹征琦 审校

西安交通大学出版社

外国教材精选

离散时间控制系统

[日] 绪方胜彦 著

刘君华 等译

万百五 尹征琦 审校

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书著者绪方胜彦多年来主要研究实现离散时间控制系统的最优控制，是世界范围内自动控制领域的著名专家，他所著的《现代控制工程》一书早已译成中文为我国广大读者所熟悉，现在仍被世界各国许多大学选作教科书或主要参考书。

本书主要介绍采用计算机对离散时间控制系统的分析与设计的综合处理方法。前四章介绍应用经典控制理论及常规设计技术分析设计单输入-单输出离散时间控制系统。后三章介绍近代控制理论实现对多输入-多输出最优离散时间控制系统的设计与分析。内容丰富，新颖，全面而又系统。

本书将现代控制理论的内容与所需的基础知识（包括数学和经典控制理论）有机结合，内容由浅入深、层次分明、论证严谨；概念阐述深入浅出、清晰易懂。故本书不仅适合作为高级工程技术和研究人员的参考书，而且也适合作为大学生、研究生的教科书，同时还是初次从事计算机控制工程技术人员的十分有用的自学参考书。

Discrete-time Control Systems
Prentice-Hall, Inc., 1987

离散时间控制系统

[日] 绪方胜彦 著

刘君华 等译

万百五 尹征琦 审校

责任编辑 严冬

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张 44.75 字数: 1105 千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数: 1—2000

ISBN7-5605-0229-6/TN·10 定价: 9.05元

《外国教材精选》总序

近十年来，我国高等学校教材建设在经历了从无到有、巩固提高的过程之后，目前正进入向高质量、高层次、多品种发展的欣欣向荣，百花争艳时期。现在，教材建设仍是高等学校教学改革的重要方面，这里也存在一个改革开放的问题。在这种形势下，精选国外一些有影响、有特色、特别是世界上著名大学现用的优秀教材翻译出版，无疑将对我国当前教材建设起到借鉴、促进和填补某些学科空白的积极作用。为此，西安交通大学出版社决定组织翻译出版一套《外国教材精选》系列书。

外国教材专业面广、类型繁多、层次各异，我们这套系列书在选题时以专业面较广，内容新颖或具有明显特色的教材为目标。具体原则如下：

1. 列选的教材不限国别及语种，以便博采众长。
2. 国外著名经典性教材，多次修订重版经久不衰者。
3. 最新出版，为国外著名大学所采用，有独特风格、体系，能反映国外教育动向，可供借鉴者。
4. 反映最新科技成果，能填补国内某学科教材空缺者。

根据我校具体情况，《外国教材精选》系列书将以电类教材（含电力、电子、计算机与信息科学）为主。今后随着形势的发展和需要，再进一步组织其他学科的国外先进教材翻译出版。

我们期望这套系列书，不仅是高等学校的学生和教师的良师益友；而且对已在生产科研第一线的广大科技工作者的知识更新，吸取国外科技新成果方面也大有裨益。

这套《外国教材精选》虽然从搜求原著、遴选、翻译、审校等方面都做了较细致的工作，但从浩如烟海的外国教材中精选少数形成一套系列书，对我们毕竟还是一种尝试。书源还不够充分，经验也感不足，缺点在所难免，诚挚地希望读者予以指正。

西安交通大学《外国教材精选》编委会

1988年6月

译者的话

著者绪方胜彦的名字中国读者并不陌生。他所著的《现代控制工程》一书早已译成中文，对我国自动控制事业产生了巨大的影响。至今它仍然是世界范围内许多大学采用的教科书和自动控制工程师们的必备参考书，堪称论述连续时间控制系统的一部经典著作。

经过十多年日新月异的发展，采用具有许多优越性的微处理器与微型计算机组成离散时间控制系统已经形成一股新潮流。我国也不例外，在用计算机组成离散时间系统取代模拟控制系统正逐渐形成高潮的今天，我们将绪方胜彦1987年1月出版的新著《离散时间控制系统》译成中文奉献给广大读者。本书自出版发行之日起就已被用作美国明尼苏达大学机械、电气工程系数字控制与自动控制课的教科书。

本书的主要目的是全面系统论述离散时间控制系统分析与设计的综合处理方法。它的特点是：就其内容气势庞大，广博精深。在内容的组织方面独具匠心，不但脉络清楚层次分明，尤其是知识层次连贯流畅，即使初学者也不会感到大的跳跃。在写作手法上，由浅入深、论证严密。将大量的例题与每章后面的题解作为教材的有机组成部分，使概念的阐述深入浅出，清晰易懂。

基于本书的上述特点，不仅从事自动控制工作的高级工程技术人员、研究生能从本书获得对离散时间控制系统分析与设计方面详尽的知识与透彻的了解，而且本书也特别适合作为大学生学习数字控制系统或离散时间控制系统课程的教科书与教学参考书，以及熟悉模拟控制系统设计的工程技术人员的自学参考书。就是缺乏系统的数学基础与经典控制理论基础的初学者也能在本书的帮助下一步一步地进入离散时间控制领域，而无需自己寻找其他参考书来填补自己所缺的基础。

万百五教授、尹征琦老师详细地校阅了全部译稿，并提出了许多宝贵的建议，对译者帮助极大，译者对此表示衷心感谢。还要感谢姜桐教授，张可村副教授在翻译过程中给予我们的热情帮助。本书第一章由朱长纯翻译，第六章由朱瑞琪翻译，第五章与附录由张华俊、刘君华翻译，第二、三、四、七章由刘君华翻译。全书最后由刘君华进行修改与整理。由于译者水平有限，书中必然存在一些缺点与错误，欢迎读者批评指正。

译者

1988年12月

前 言

在很多工业控制系统中，数字计算机已成为构成整体运行不可缺少的一部分。近年来更倾向于发展动态系统的数字控制而不是模拟控制，其主要原因是数字计算机方面新近取得的革命性发展，以及处理数字信号比处理连续时间信号更有优越性。此外，由于微处理器与微型计算机价格低廉，因而目前已经形成这样的趋势：为了获得最佳控制性能，即使小规模控制系统也采用数字计算机。

本书的主要目的是给出对离散时间控制系统分析与设计的综合处理方法。特别是，本书对离散时间控制系统研究方面的有关概念给予了清晰而又深入浅出的解释。

这本书可以用作为离散时间控制系统，数字控制系统或离散时间系统原理课程的教科书。本书是为高级工程（电气、机械、航天、或化学）学者或低年级研究生撰写的。在一年为四学期制的两个学期中可以讲授完全部内容。在一年为两学期制的一个学期内教师可以灵活地选择某些内容进行讲授。这本书也可用作为有实践经验的工程师们希望学习离散时间控制理论时的自学教材或参考书。

由于作者是从工程师的观点来写作这本书的，故在说明中着重于所涉及的基本概念而小心避免深奥的数学论证。全部材料是按照离散时间控制理论循序渐近的原则来组织的。

本书主要内容是：第一章介绍离散时间控制系统的一般概念。第二章说明 z 变换原理。第三章论述离散时间控制系统 z 域分析的基础知识。第四章讨论离散时间控制系统的各种变换设计法。第五章介绍包括 Liapunov（李雅普诺夫）稳定性分析在内的基本状态空间分析。第六章阐述可控制性和可观测性，极点配置技术，状态观测器的设计和伺服系统。最后一章，第七章，讨论二次型最优控制问题，系统辨识和 Kalman（卡尔曼）滤波器。因为状态空间分析需要适当的向量-矩阵分析作基础，所以在附录中提供了向量-矩阵分析的概述。

为使读者更清楚地理解书中所涉及的内容，除第一章与附录外，在每章结尾都提供了大量的题解。除了题解之外，书中还给出了很多习题（没有解）以帮助读者检验自己对内容材料理解的程度。书中提供的大多数材料（包括有解的问题和没解的习题）已经受过明尼苏达大学高年级与一年级研究生水平的控制系统课课堂教学实践的考验。

感谢所有那些帮助过作者撰写本书的人们。感谢无名的书刊评论者在撰写过程中提出的许多评论与有价值的建议。真诚地向 E. I. Jury 教授致谢。他严格地审查了全部手稿并提出了建设性的意见。这些意见已经用于 z 变换法以及书中很多其他内容表述的改进中了。还要诚挚地感谢 Naval Post 研究院 Alan Kraus 教授，他仔细校对、润色了全部手稿，有力地促进了最后定稿。

还要感谢我以前的学生们，他们做了题解并对书中的内容进行了大量建设性评论，且在讲课期间他们提出了各种问题，使本书对读者可能产生的问题给予了详细的解释。

最后，还要对 Bernard M. Goodwin（执行编辑），John J. Mocanna，（Prentice-Hall 出版社驻明尼苏达代理），以及 Tim Bozik（编辑），热情支持本书的撰写表示谢意。

Katsuhiko Ogata

绪方胜彦

目 录

第一章 离散时间控制系统绪论

1—1	引言	(1)
1—2	数字控制系统	(3)
1—3	量化和编码	(11)
1—4	数据采集, 变换和分配系统	(15)
1—5	结论	(23)

第二章 z 变换

2—1	引言	(27)
2—2	z 变换	(27)
2—3	基本函数的 z 变换	(29)
2—4	z 变换的重要性质和定理	(34)
2—5	z 反变换	(46)
2—6	脉冲传递函数和加权序列	(61)
2—7	提要	(66)
	例题和解答	(67)
	习题	(95)

第三章 z 域分析的预备知识

3—1	引言	(99)
3—2	离散控制系统与脉冲采样	(100)
3—3	卷积积分法求解 z 变换	(107)
3—4	由采样信号再现原信号	(115)
3—5	脉冲传递函数	(124)
3—6	求相邻采样瞬时之间的响应	(143)
3—7	数字控制器与数字滤波器的实现	(147)
3—8	s 平面与 z 平面之间的映射	(160)
3—9	z 域内闭环系统稳定性分析	(166)
	例题和解答	(175)
	习题	(209)

第四章 离散时间控制系统变换设计法

4—1	引言	(216)
-----	----	---------

4—2	求连续时间滤波器的离散时间等效滤波器	(217)
4—3	模拟控制器的离散等效设计原理	(232)
4—4	暂态和稳态响应分析	(239)
4—5	根轨迹设计法	(254)
4—6	频率响应设计法	(270)
4—7	解析设计法	(281)
	例题和解答	(294)
	习题	(330)
第五章 状态空间分析法		
5—1	引言	(335)
5—2	离散时间系统的状态空间表达式	(337)
5—3	离散时间状态方程的求解	(349)
5—4	脉冲传递函数矩阵	(357)
5—5	连续时间状态空间方程	(361)
5—6	连续时间状态空间方程的离散化	(378)
5—7	李雅普诺夫稳定性分析	(384)
	例题和解答	(395)
	习题	(440)
第六章 状态空间分析和设计		
6—1	引言	(447)
6—2	可控性	(448)
6—3	可观测性	(455)
6—4	状态空间分析和设计中的有用变换	(461)
6—5	极点配置设计法	(466)
6—6	状态观测器	(487)
6—7	伺服系统	(515)
	例题和解答	(529)
	习题	(573)
第七章 最优控制系统		
7—1	引言	(580)
7—2	二次型最优控制	(582)
7—3	稳态二次型最优控制	(595)
7—4	伺服系统的二次型最优控制	(607)
7—5	系统辨识	(612)
7—6	卡尔曼滤波器	(619)
	例题和解答	(630)
	习题	(657)
附录	向量-矩阵分析	(663)

第一章 离散时间控制系统绪论

1-1 引言

近年来,在控制系统中数字控制器的使用日益增多。实际上,数字计算机已成为许多工业控制系统的一部分。数字控制通常是用来使系统获得最优性能,例如,使系统具有最大的生产率,最大的效益,最低的成本或最小的能耗。微处理器与微型计算机近来已发展到能适用于各种控制功能的需要,这就形成了一个新的发展趋势,就是即使在小规模控制系统内,也要把数字计算机包括在其中,以获得最优控制性能。

由于计算机控制技术的使用,使得工业机器人的“智能动作”,汽车燃料节省的最优化,家用设备以及象微波炉和缝纫机这类机器运行性能进一步的改善成为可能。数字控制系统的主要优点是,它具有决策能力,其控制程序具有灵活性。

当前,动态系统倾向于采用数字控制,而不再采用模拟控制。其主要原因是已有廉价的数字计算机可供利用,且处理数字信号比处理连续信号更有优点。

在控制工程中,数字计算机用于两种不同的目的。首先,它们用于复杂控制系统的分析与综合,包括对复杂控制动力学的数字模拟,及数字计算。其次,它们作为控制器而被包括在控制系统的闭环之中。本书的重点是数字控制器,而不是对复杂控制动力学的数字模拟或数字计算。

信号类型 连续信号是定义在整个连续时间范围内的信号。它的幅值在某一定区间内呈现连续值,或仅可能有有限个间断点。取一组间断的数值来表示一个变量的过程叫做整量化,而产生的这组间断值叫做量化值。整量化了的变量仅按一组断续阶跃值变化。

模拟信号是定义在整个连续时间范围内的信号。它的幅值在某一定区间内呈现连续值。图1-1(a)表示连续时间模拟信号;图1-1(b)表示连续时间整量化信号(仅幅值上进行了整量化)。

应注意,模拟信号是连续信号的特殊情况。但实际上,我们常常用术语“连续”代替“模拟”。因此在文献中,包括本书,“连续信号”与“模拟信号”经常交替使用,严格说来它们是不完全同义的。

离散信号是仅仅定义在各个离散瞬时上(即,在某个离散的時刻,独立变量 t 是整量化了的)的一种信号。在离散信号中,若幅值可为连续范围中的任意值,则称为采样数据信号。采样数据信号是对模拟信号在各个离散瞬时上采样而产生的。它是一种调幅脉冲信号。图1-1(c)表示采样数据信号。

数字信号是幅值整量化了的离散信号。这种信号可由一系列数字来表示,例如,用二进制数表示。(实际上,很多数字信号是由模拟信号采样后,再将它们整量化得到的;整量化就是将这些可具有无穷多个值的模拟信号,取作由有限数组成的二进制数。)图1-1(d)描绘了一个数字信号。显然,它是幅值和时间都整量化了的信号。使用数字控制器,要求信号既在幅值上,同时又在时间上都进行整量化。

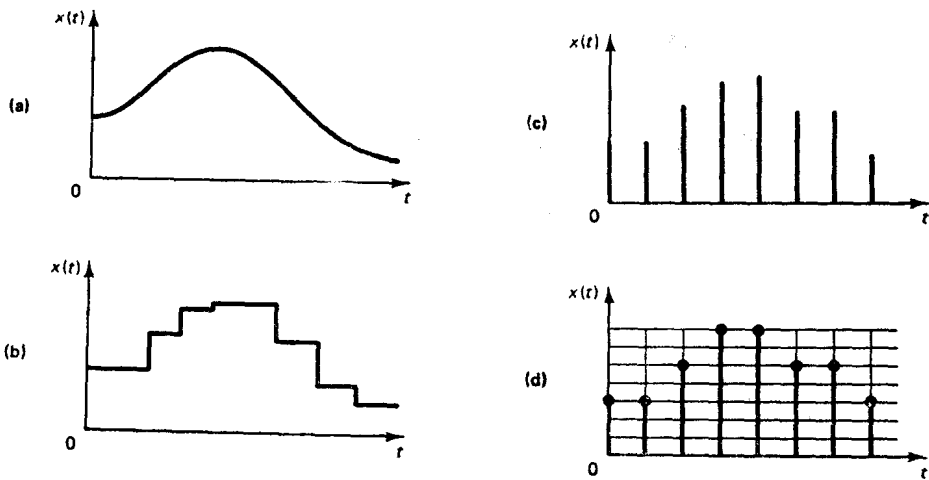


图 1-1 (a)连续时间模拟信号; (b)连续时间整量化信号; (c)采样数据信号; (d)数字信号

术语“离散信号”比“数字信号”或“采样数据信号”用得更广泛。实际上，离散信号既可指数字信号也可指采样数据信号。实用的习惯是，术语“离散”与“数字”往往交替使用。然而，“离散”常用于理论研究，而“数字”则用于与硬件或软件的实现方面。

在控制工程中，控制的对象是~装置或~过程。它可能是物理的装置或过程，也可能是非物理的，如像经济过程。大多数装置和过程都涉及连续信号，故若控制系统中包含有数字控制器的话，则信号变换（模拟到数字，数字到模拟）就必不可少。

粗略地说，象离散控制系统，采样数据控制系统和数字控制系统，这三个术语都意指同样类型的，或非常类似的控制系统。精确地讲，当然，这些系统是有区别的。例如，在采样数据控制系统中，连续信号和离散信号都存在；其中离散信号是调幅脉冲信号。数字控制系统中可能存在连续和离散两种信号；这里，后者是以数码形式出现的。采样数据控制系统和数字控制系统，两者都是离散控制系统。

很多工业控制系统包含有连续信号，采样数据信号和数字信号。因而，在本书中，我们采用“离散控制系统”来描述包含有某种形式的采样数据信号（调幅脉冲信号）和（或）数字信号（数码形式表示的信号）的控制系统。

最后应注意，采样数据控制系统可以有模拟控制器；尽管数字控制与采样数据控制系统所用的部件有差异，但这些系统是可以同样的离散时间分析技术进行分析与设计的。

本书研究的系统 本书讨论的几乎全部是线性时不变离散控制系统；而非线性和（或）时变系统，只在讨论中偶有涉及。在线性系统中，叠加原理是适用的。因此，若 y_1 是某系统对输入 x_1 的响应， y_2 是对输入 x_2 的响应，当且仅当对输入 $\alpha x_1 + \beta x_2$ 的响应是 $\alpha y_1 + \beta y_2$ 时（ α 和 β 均是标量），系统就是线性的。

线性系统可由线性微分或线性差分方程来描述。其差分方程或微分方程中的系数不随时间变化的线性系统，就叫做时不变线性系统，即系统的特性不随时间改变。

离散控制系统和连续控制系统 有一个或多个变量仅在一系列离散的瞬时上变化的控制系统叫做离散控制系统。我们把这些瞬时记为 hT 或 t_k ($h=0, 1, 2, \dots$)，在这些瞬时可对某些物理量进行测量，或者从数字计算机的存储器读出数据。两个相邻离散瞬时的间隔取得相当短，以致两个瞬时之间的数据可用简单的插值法来近似求得。

离散控制系统与连续控制系统的区别，在于离散控制系统的信号是采样数据形式，或者是数字形式。如果数字计算机在控制系统中被用作数字控制器的话，任何采样数据都必须转换成数字数据。

连续系统可以用微分方程来描述。这类系统的信号在时间上是连续的。离散系统中的信号可以是采样数据信号或数字信号，也可以是连续信号；在将连续信号适当的离散化之后，离散系统可由差分方程来描述。

采样过程 对连续信号的采样，是用离散瞬时上的序列值，替代初始的连续信号。包含有数字控制器的控制系统，采样过程总是不可缺少的；为了把数据输入数字控制器，必须进行采样和整量化。采样过程也总是发生在控制所需要的测量，是以间断方式进行的场合。例如，在雷达跟踪系统中，当雷达天线旋转时，有关方位角和仰角的信息，是天线每旋转一次而获得一次。因此，雷达扫描运行产生了采样数据。另一例子是，为节省费用，大型控制器或计算机由几个控制对象来分时享用，这时也需要采样。于是只能周期地向每个被控对象发送控制信号。因而信号变为采样数据信号。

采样过程之后常常跟随着整量化（简称量化）过程。在量化过程中，将模拟量的采样值用数字值（二进制数表示的）来代替。然后，则由计算机来处理数字信号。计算机输出的是采样讯号，并被送至保持电路。保持电路输出连续信号，并被送到执行机构。我们将在 1-4 节中的数字控制器部分详细介绍这种信号处理的方法。

大多数现代工业控制系统，是离散控制系统。因为它们总是有采样操作。在本书中，我们要介绍离散控制系统的分析和综合技术。在这类系统中，用以表示控制作用的信号是分段常量，并且只在时间的离散点上发生变化。

尽管“采样”与“离散化”两者有基本相同的含义，但在分析多输入-多输出系统时，我们更常用“离散化”这一术语。

应当指出，有时采样操作或离散化完全是假想的，引进它们的目的，仅仅是为了对实际上只包含连续信号的控制系统进行简化分析。事实上，我们常对一个连续系统使用一个适当的离散模型。连续系统的数字计算机模拟就是例子。这类数字计算机所模拟的系统，可以分析出一组系统参量，使给定的性能指标优化。（参看 7-1 节性能指标优化的定义。）

本书讨论的大多数控制系统，是能以线性时不变离散系统作为模型。重要的是，很多数字控制系统的设计技术，是建立在连续控制系统的设计技术基础之上的。由于对连续控制系统已积累了大量的设计经验，在设计离散控制系统中，它们是极有参考价值的。

1-2 数字控制系统

设置在控制环中的数字计算机，按所要求的方式执行信号处理，这种控制模式叫做直接数字控制。60 年代以来，直接数字控制已经应用于大规模过程控制系统；在化工以及其他过程中，直接数字控制在提高生产率，改善产品质量和节省劳动力方面已发挥了很大效力。70 年代中期以来，由于微处理器和微型计算机令人鼓舞的进展，控制工程师已经能够在大规模及小规模的多控制系统中广泛使用直接数字控制技术。

过程或对象的直接数字控制与对应的模拟控制相比，有下列优点：

1. 在数字控制器中数据处理是直截了当的；很容易执行复杂的控制计算。

2. 如果需要，改变控制程序（控制器特性）很容易。
 3. 从内部噪声和漂移效应的角度来看，数字控制器远较相应的模拟控制器优越。
- 然而，数字控制器也有一些缺点：

1. 采样和量化过程产生的误差，使系统性能有所下降。
2. 设计数字控制器去补偿此种性能下降，比设计一个同等性能水平的模拟控制器更复杂。

框图 1-2 描绘了一个数字控制系统的基本结构。系统包括有反馈控制和前馈控制。设计系统时，应注意到控制系统的“优度” (goodness) 是与特定情况有关。对给定的情况，我们必须选择一个合适的性能指标，并如此设计一个控制器使得所选择的性能指标优化。

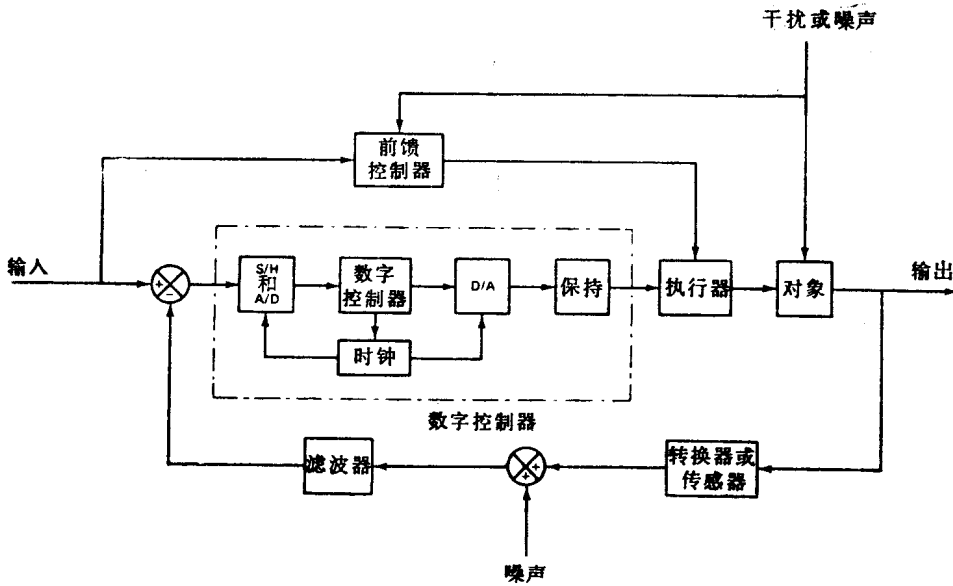


图 1-2 数字控制系统框图

下面，我们先介绍用于讨论数字控制系统的术语，并列举采样操作的类型。然后讨论几例数字控制系统，如数值控制系统，机器人手臂控制系统和机器人手握力控制系统。

简化的数字控制系统 图 1-3 是一个简化的数字控制系统框图。系统的基本单元由方框

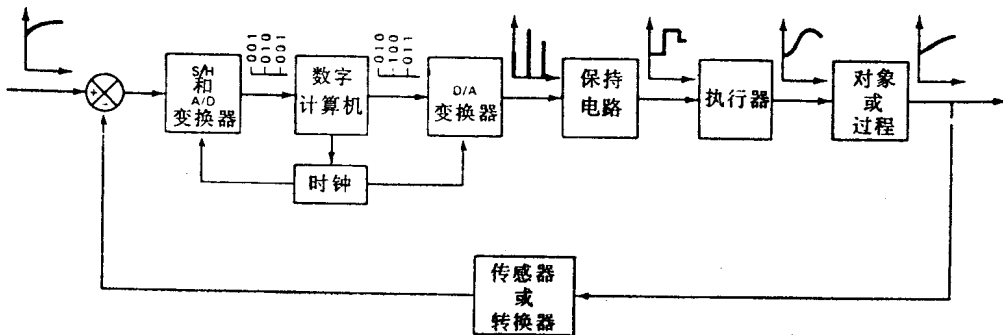


图 1-3 用二进制数或图形方式表示信号的数字控制系统框图

表示。由时钟控制控制器的运行。在这个系统中，如图所示，某些点既传递幅值变化的连续信号，也传递幅值变化的离散信号，而另一些点则传递数码形式的信号。

被控对象输出连续信号,并经采样—保持电路和模-数变换器变换为数字信号。变换在采样瞬时进行。数字计算机借助于一个算法将输入的数字序列加以处理,并再产生出新的数字序列。在每个采样瞬时,一个数码(通常是由8位或更多位的二进制数位组成的二进制数)被变换为物理控制信号,往往是连续信号或模拟信号。是由数-模变换器和保持电路把数码形式的数字序列变成分段连续信号。全部动作由计算机中的实时时钟来同步。由保持电路向被控对象馈送连续信号,或直接地,或通过执行器控制它的动态性能。

把连续信号变换为离散数据的操作叫做采样或离散化。反之,把离散数据变换为连续信号的操作叫做数据保持;它等效于从一串离散数据再现连续信号。这由多种外推技术中之一种来实现。通常是将相邻采样瞬时之间保持信号为常量。(我们将在1-4节中讨论这种外推技术)。

采样-保持(S/H)电路和模-数(A/D)变换器可把连续信号变为二进制编码的数字序列。称这种模-数变换过程为编码。采样-保持电路和模-数变换器结合,可以看作为开关,每隔 T 秒钟瞬时地闭合一次,并产生数码形式的数字序列。该数字序列经数字计算机运算处理后,并产生另一串所要求的数码形式的数字序列。数-模(D/A)变换过程叫做解码。在1-3节中将对编码与解码作更多的介绍。

定义 在详细讨论数字控制系统之前,需要对图1-3中出现的某些术语给出定义。

采样-保持(S/H) “采样-保持”是采样-保持放大器的一般叫法。它描述这样一个电路,该电路接受模拟输入信号,并在规定的时间内保持该信号为恒定值。它通常是电信号,也可能是其他形式的,如光信号和机械信号。

模-数变换器(A/D) 模-数变换器也称为编码器。是一种能把模拟信号变换为数字信号,通常是数字编码信号的装置。在模拟部件与数字部件之间需要它作为接口。采样-保持电路往往作为商业出售的A/D变换器的组成部分,由模拟信号变为相应的数字信号(二进制数)是一个近似过程。因为模拟信号可有无穷多个数值,而由一组有限数位的二进制数组成的各种不同的数,却是有限的。这种近似过程叫做整量化。(更多的整量化问题在1-3节中介绍。)

数-模变换器(D/A) 数-模变换器也称为解码器。它能把数字信号(数值上编码的数据)变换成模拟信号。在数字部件与模拟部件之间需要它作为接口。

对象或过程 对象是任何被控的物体。例如,加热炉,化学反应器以及为完成某一特定动作而有机结合的一组机械零部件,如像伺服机构或宇宙飞船。

过程一般定义为进行着的运转或发展,其特征是,有一系列逐渐的变化以相对固定的方式相继发生在运转或发展状态中,并且最后导致一个特定的结果或终结。在本书中,我们称任何被控制的运行状态为过程。例如,化工过程,经济过程以及生物过程。

设计控制系统最困难之处,可能在于确定物理对象或过程的精确模型。尽管求解对象或过程的模型有很多途径,但困难仍可能存在。主要因为对过程精确的动力学还缺乏了解,以及在很多物理对象或过程中还存在未被解释的随机参量。因此,被控对象或过程的数学模型,在很多情况下仅仅是物理对象或过程的一种近似。在设计数字控制器时必须充分认识到这一点。但是机电系统和液压机械系统除外,因为它们可被精确地模型化。例如,机器人手臂系统的模型可以达到极高的精度。

转换器 是一种把输入信号转换成另一种形式的输出信号的器件,如象把压力信号转换成电压输出的器件。通常,输出信号取决于输入信号过去的历程。

转换器可分为模拟转换器,采样数据转换器,或数字式转换器。模拟转换器的输入与输

出信号都是连续时间函数。在系统的实际限度以内，这些信号的幅值可以是任何值。在采样数据转换器中，输入信号和输出信号仅发生在离散的瞬时上（通常是周期性的），但是信号的幅值，则与模拟转换器的情况相同，系非整量化的。在数字式转换器中，输入和输出信号只发生在离散的瞬时上，并且信号的幅值是整量化的（即幅值只取离散的值。）

采样操作型式 如前所述，我们称信号的自变量 t 是离散的这种信号为离散信号。采样操作的基本作用是把连续信号转换成离散信号。

有几种不同的，实践上也比较重要的采样操作型式：

1. 周期采样 在这种情况下，采样瞬时是等间隔的，即 $t_k = kT (k=0, 1, 2, \dots)$ 。周期采样是最普通的采样操作型式。

2. 多阶采样 在这种情况下， t_k 的型式是周期性重复的；即对于所有的 k 值， $t_{k+r} - t_k$ 是常量。

3. 多速采样 在多环控制系统中，其中某环具有最大的时间常数，它可能与其他环路的时间常数完全不同。从而，在有大时间常数的环路中，慢速采样是可行的，而在小时间常数的环路中，应该快速率采样。因此，数字控制系统在不同的反馈路径中，可以有不同的采样周期，即可以有多个采样速率。

4. 随机采样 在这种情况下，采样瞬时是随机的，即 t_k 是随机变量。

在本书中，我们只讨论周期采样的情况。

数字控制系统 装备了计算机的数字控制系统是直接数字控制系统，由于很容易得到廉价的微处理器和微型计算机，这种系统已在工业中广泛使用。由于应用了微处理器或微型计算机进行必需的数据处理，数字控制机床的价格已经降低，尺寸已经缩小。

数字控制是一种用二进制数字来控制机器部件运动的方法。输入数据（例如，包括待加工的机器零部件的尺寸和形状），还有顺序加工的次序，都以二进制数序列的形式存储在磁带或磁盘上。称这种磁带或磁盘为输入磁带或输入磁盘。数字控制系统的基本特点在于，它是利用电的（或其他形式的）信号，将输入数据中的二进制数转换成物理量（大小或数量），

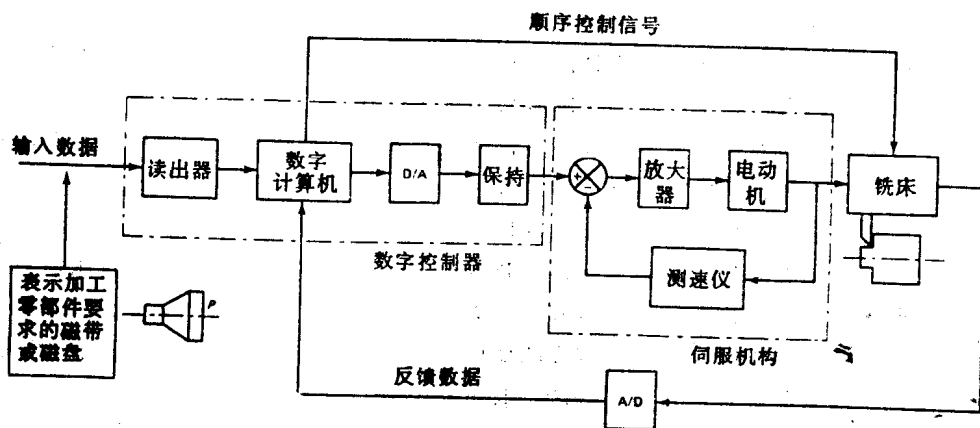


图 1-4 数控铣床框图

这样就把电码译成直线运动或圆周运动。

图 1-4 表示一个数控铣床的框图。该系统工作程序如下：按照对工件 P 的要求，在输入磁带或磁盘上进行二进制编码。系统起动后，于是输入磁带或磁盘上的二进制数被读出器转

换成输入脉冲信号，送进系统。首先输入脉冲信号与反馈脉冲信号进行比较（通常两者都是频率调制信号），而差值信号（误差）在计算机内以预定的所希望的型式进行处理，以便将这个误差减小。计算机的输出送到数-模变换器。D/A变换器和保持器把数字数据变换成模拟电压信号。这个信号就是伺服马达的输入信号，如图中所示。（在需用功率相对小的某些应用场合，步进电机用来代替直流伺服马达。）计算机也送出程序操作信号。与刀盘连结在一起的转换器，将刀具的运动变换为电信号。然后由模-数变换器将它再变换成脉冲信号。由于数值控制系统能精确地读出加工图形或轮廓的数据，并在顺序的程序中能快速决策，因此它可以既改善产品的质量，又提高生产率。

图 1-5 表示当步进电机用于刀盘定位时，工件轮廓逼近的例子。在计算机处理了输入数据后，步进电机系统使铣床刀盘在 xy 平面内定位。从计算机到步进电机的指令脉冲的数和型式决定着步进电机需要移动的量 and 方向，以便它携带刀盘到正确的 x 和 y 坐标位置上。许多情况中，每个指令脉冲在 x 或 y 方向移动 $1\mu\text{m}$ （或 $10\mu\text{m}$ ）。例如，若计算机发出在 x 正方向 5 个指令脉冲的移动量，则刀盘将在 x 正方向移动 $5\mu\text{m}$ （或 $50\mu\text{m}$ ）。因此，刀盘在 x 或 y 方向每次移动 $1\mu\text{m}$ （或 $10\mu\text{m}$ ）。这意味着刀盘在 x 和 y 方向，都以 $1\mu\text{m}$ （或 $10\mu\text{m}$ ）数量级的精度描绘一个给定的曲线。所以，图中给定的轮廓线能够保持有高的精度。数控铣床的优点是能够以最大的加工速度、以相同的公差来加工复杂零件。

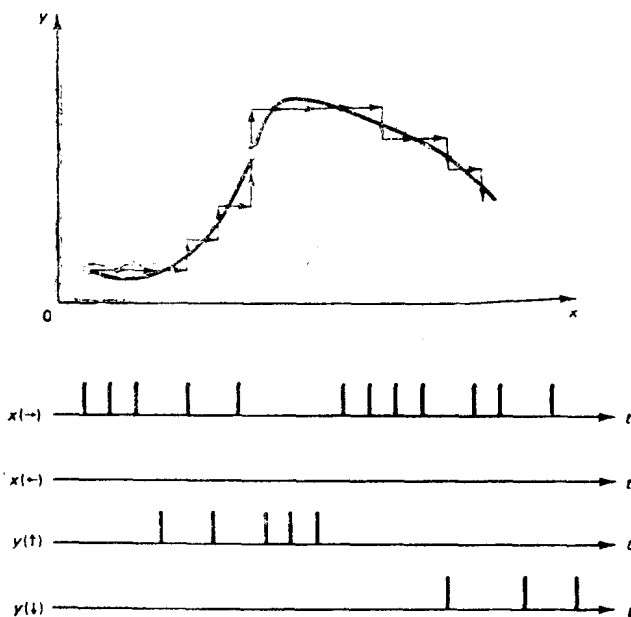


图 1-5 数控铣床的轮廓线逼近

装备了计算机的数字控制系统是实时运行的。计算机必须求解代数方程以确定在 xy 平面上移动的方向，还必须每 $100\mu\text{s}$ 左右时间发出一个脉冲信号。为了要加快计算时间，不仅微处理器必须有快速处理数据的能力，而且计算机程序的条数也必须最少。

除了它的价格低廉和尺寸紧凑外，装备了计算机的数字控制系统还有功能上的优点。在每次加工同样工件时，不需要倒卷输入磁带。另外，增加存储器的容量可以存储更多不同的输入数据，从而可能连续地加工许多不同类型的工件并提高生产率。

机器人手臂控制系统 在工业中，机器人常被用来提高生产率。机器人能够从事千篇一律的以及复杂的工作，而在操作中没有任何误差。机器人能够在操作人员不可能工作的环境中操作。例如，它可在极端温度（极高和极低）或者在高压或低压环境中，或者在水下或空间中工作。还有消防、水下探测和空间探测，以及很多其他领域中的专用机器人。

工业机器人应该能抓举具有特殊形状和重量的机械零件。因此，它应该至少有一个臂、一个手腕和一只手。它必须有执行任务足够的功率，和具有最低限度灵活性的能力。80年代

以前使用的大多数机器人，只限于直线运动或圆弧运动。这个时期的某些机器人，能够在工厂中的有限空间内，由它们自己自由地移动。

工业机器人必须有某些感觉器件。在低级机器人中，微动开关安装在手臂中作为感觉器件。机器人先触及到物体，然后通过微动开关证实物体在空间中存在，于是下一步便是抓住它。在高级机器人中，应用光学装置（如象电视系统）扫描物体的背景。它识别模式，并且确定物体的存在与方位。对模式识别过程中的信号，需要用计算机加以处理。（参看图 1-6。）在某些应用场合中，装备有计算机的机器人利用模式识别过程去识别每个机器零件的存在与方位，这个识别过程由读取存在计算机内的代码组成。然后机器人抬起零件，并把它移到组装所需的位置，在那里机器人把几个零件装配成一个部件。

图 1-7 是一个简化型机器人手臂控制系统的示意图。该图表示手臂直线运动的控制。直线

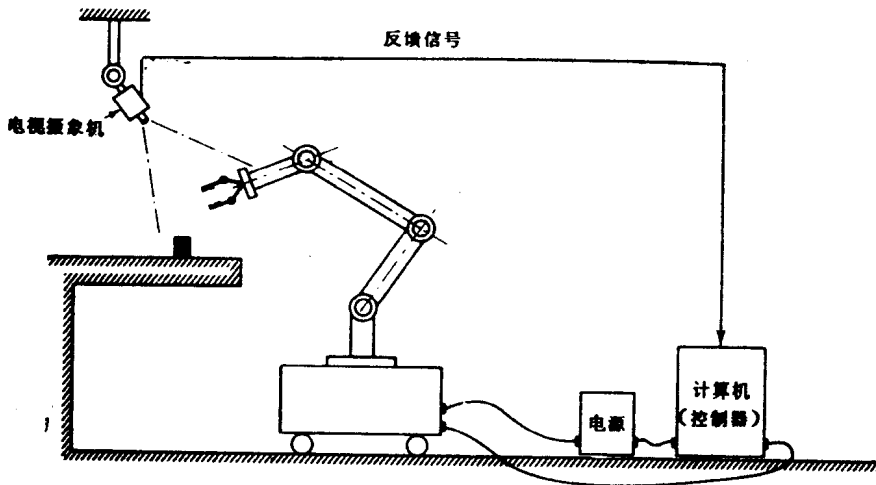


图 1-6 应用模式识别过程的机器人

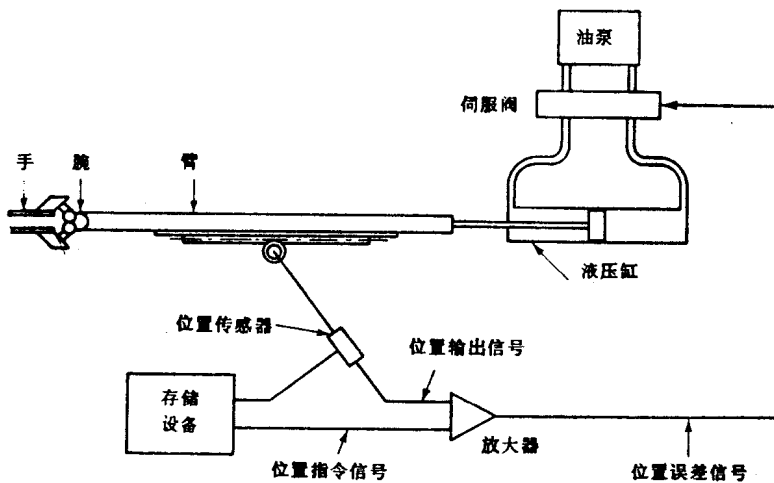


图 1-7 机器人手臂控制系统

运动是一个自由度的运动。实际的机器人的臂有 3 个自由度（上下运动，前后运动和左右运动）。与臂一端连接在一起的手腕，也有 3 个自由度，而手有一个自由度（抓）。故机器人手臂共有 7 个自由度。若机器人身体必须在平面上移动的话，则需附加自由度。通常，机器

手是可更换的部件：不同类型的抓握装置与手腕连接后，可像手那样抓紧各种不同类型的机械物体。

应用伺服机构使臂和手腕定位。由于机器手臂运动往往需要速度和功率，常采用液压或气动压力作为动力源。直流电机可满足中等功率的要求。小功率装置可用步进电机。

控制顺序运动的指令信号需要存储在磁带或磁盘上。在高级机器人系统中，常采用“重演” (Playback) 控制模式。在这类模式中，首先操作人员通过操纵与手臂连接在一起的操纵杆“教”机器人按顺序动作一遍，则所需要的顺序运动的指令便存储在机器人内部的计算机中。然后，从第二次起，机器人就忠诚地重复这个运动的顺序。图 1-8 表示图 1-7 所示的机器人手臂控制系统，该系统已具有参与“教会”重演控制模式所用的电路和装置。

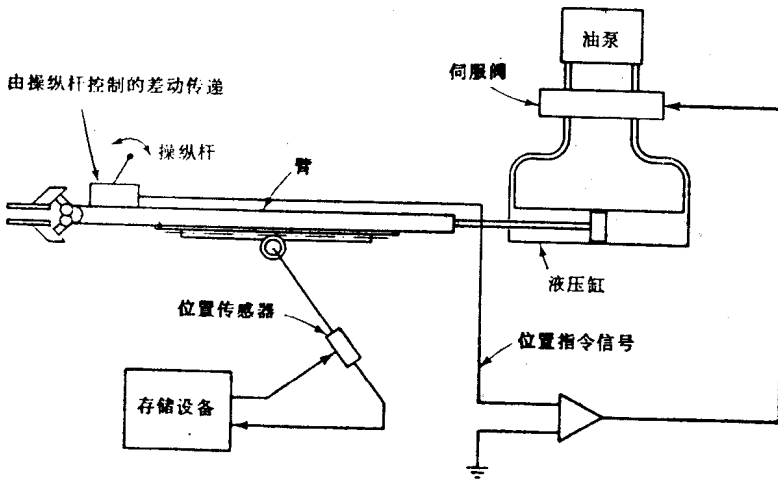


图 1-8 图 1-7 所示机器人手臂系统的重演控制模式

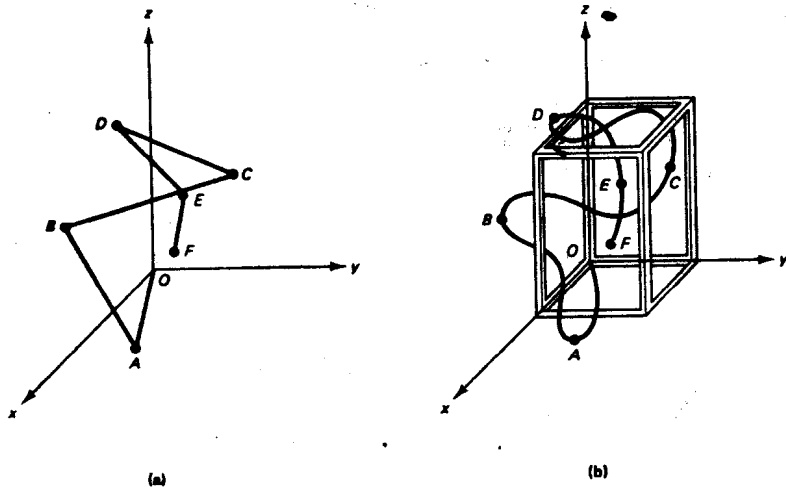


图 1-9 (a)点到点控制: (b)连续路径控制

在两维或三维空间，有两种控制运动路径的方法：点到点控制和连续路径控制（参看图 1-9）。在空处移动手臂时，可利用点到点控制。如果要求手臂在一个复杂的结构中进出，则应该采用连续路径控制。例如，在汽车装配厂中的电弧焊机器人，就需要精密的连续路径控制，因为手臂必须穿过复杂结构的车身移动。（移动手臂的精确度是 $\pm 1\text{mm}$ 级。）工业