

微处理机数字控制

PAUL KATZ 著

徐 缤 昌 等 译

陈燕庆 林其璈 校



宇航出版社

微处理机数字控制

PAUL KATZ 著

徐缤昌 等译

陈燕庆 林其璈 校

宇航出版社

ISBN 69

微处理机数字控制

PAUL KATZ 著

徐缤昌 等译

陈燕庆 林其璈 校

*

宇航出版社 出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

八九九二〇部队印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/32 印张：11 9/16 字数：300千字

1984年9月第一版第一次印刷

印数：1-22000

统一书号：15244·0007

定价：2.15元

010018P

译 者 序

近年来,微处理机在我国发展很快,在工业、交通、国防等许多领域中都得到了广泛的应用。

本书是关于微处理机实时控制系统理论及设计的专著。目前,论述微处理机或一般采样系统的书籍已经很多,但像本书这样将微处理机与控制系统有机地结合在一起,并详细论述由于在系统中引入微处理机而出现的一系列新问题,诸如采样频率的选择、量化误差的处理以及控制算法在微处理机上的具体实现等进行阐述的却很少。作者对这些问题不仅进行了理论分析,而且提出了在工程上的解决方法。书中还介绍了天线伺服系统、导弹数字式自动驾驶仪及导弹自动导引系统等典型实例,并附有完整的程序,有一定参考价值。

本书的翻译出版,对我国从事微处理机控制研究的广大科技人员、大专院校有关专业的师生以及其他从事这方面工作的同志,将是非常有益的。

本书由西北工业大学八〇三教研室集体翻译。其中原序、第一章及附录由李济萍译,第二、三章由阙志宏译,第四、七、九章由周凤岐译,第五章由徐缤昌译,第六、八章由欧阳玲译。最后由徐缤昌同志审阅了全文。陈新海同志对译文提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于我们水平有限,加之时间又很仓促,因此译文中一定有许多不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

译 者

1984年3月

序 言

微处理机控制器的设计是一个不断变更和迅速发展的课题。根据我的经验，那些刚从学校毕业的年青工程师们很快就能掌握这门技术，相反，那些在连续控制器的设计方面很有经验的工程师们却会感到由连续回路的设计转到微处理机的程序编制并非一件易事。

然而，由于绝大多数被控对象都是连续的，因此在设计连续系统控制器方面所获得的经验仍然是十分有用的。实际上所有数字控制系统的设计都建立在连续系统设计方法的基础上。因此本书的另一目的就是帮助那些在连续控制方面已有一定经验的控制工程师们转向数字控制的设计。

过去几年里，在数字处理和数字滤波方面出版了许多优秀的著作。但需注意，在信号的数字处理和数字控制之间是有某些差异的。信号的处理并不总是在实时情况下进行，而是允许有一定的时延。而在实现时，则可采用数的浮点表示与舍入表示。与此相反，微处理机进行数字控制是实时的，并且只使用定点二进制的补码运算，因而数是截尾的。此外，设计者在实际实现数字控制时，其主要精力集中在有限字长、采样频率的选择、算法的巧妙编程、确定所有变量和系数的比例因子、模数和数模转换装置的选择等问题上，这些问题都在本书中予以强调，并配有恰当的实例。

已经发展得相当完善的根轨迹法和伯德图法仍然是有用的，不过无需掌握绘制精确曲线图的全部技术，因为目前对

绝大多数计算机系统来说，都有现成的计算和描绘这些曲线的计算机程序可供利用。能快速给出这类曲线的主要好处在于设计师能对控制系统作出初步设计。本书也包含根轨迹及伯德图的近似描绘规则。因为它们对于用 W 平面研究数字控制极为有用。

本书是根据我和我的同事们在设计微处理机数字控制器方面的经验写出的。材料的选择及安排是按作者讲授数字控制课程一学期的内容确定的。

本书是针对大学四年级学生及从事实际工作的工程师写的。对有关定理的详细证明将压缩到最小限度。书中所举的绝大多数微控制器例子都是实际使用的系统。

第一章介绍离散、线性、定常系统的理论，着重讲述连续系统离散化的概念。第二章叙述连续控制器理论的数字控制器设计方法，并阐明了由于采样而引起的各种现象，例如信息混叠。此外，还对各种连续控制器的所有离散化方法作了比较。第三章研究离散域中的设计方法，这不是先对连续控制器进行设计的方法，但也不意味着这是抛开以往设计连续控制器的经验而另建立起来的方法。第四章探讨用状态变量法研究多输入-多输出离散控制系统。并简单阐述了极点配置、观测器设计以及线性最优控制。定理及其证明放在附录A中。第五章的内容为数字控制器在微型计算机上的实现，并论述了各种不同的实现方法。对微型计算机和微处理机开发系统作了一般性的综述。第六章对设计者来说是最重要的一章。算法的实际数字实现，包括由量化而引起的全部误差，是设计者主要关心的问题。不正确的数字编程可能会破坏一个设计得很好的数字控制器的特性。在本章中，所有这些误

差以及伴随出现的数字现象都将予以讨论。此外，还根据理论及经验向读者推荐了合理的程序编制方法。第七章讨论与第六章有关的内容，即采样频率的选择问题。增加采样频率就要求增加字长，为了经济起见，设计师力图把两者都减少。本章还介绍了两个与采样频率有关的新概念——响应逼真度(fidelity of response)和粗糙度函数(roughness function)。第八章和第九章介绍设计实例，并有详细的说明，用以说明以前各章的定理及结论。这是些实际应用的系统，并非课堂练习。在演算中将使用以前各章的定理及结果。附录A和B中包含了第四章和第七章中讨论过的内容的详细解释及一些定理的证明。

P.K.

目 录

序言

第一章 理论基础	1
1.1 引言	1
1.2 线性、定常、离散系统	2
1.3 有限差分的计算	5
1.4 z 变换	11
1.5 z 反变换	15
1.6 连续系统的离散化	17
1.7 离散和离散化线性系统的特性	27
1.8 把离散信号转换成连续控制信号	32
附录1A 经典采样数据理论的概述	37
习题	40

第二章 用连续系统的设计方法来设计数字控制系

统	43
2.1 引言	43
2.2 连续设计和补偿网络的离散化	44
2.3 数字滤波器的特性、频率响应、混叠现象	46
2.4 模拟滤波器的离散化方法	53
2.5 各种离散化方法的比较	65
2.6 设计举例	72
附录2A 利用低通滤波器、双线性变换及频率	

预曲折法进行滤波器设计·····	76
习题·····	78
第三章 数字控制系统的离散设计法 ·····	80
3.1 引言·····	80
3.2 解析设计法·····	81
3.3 z 平面设计法·····	91
3.4 在 w 平面和 w' 平面上进行设计·····	97
3.5 在 w 平面上利用频率响应进行补偿设计·····	101
3.6 w 和 w' 平面设计法举例·····	111
习题·····	117
第四章 多变量数字控制, 状态空间法 ·····	120
4.1 引言·····	120
4.2 状态空间法、极点配置、可控性·····	121
4.3 观测器的设计·····	131
4.4 基于二次型的最优控制·····	141
4.5 有噪声情况下的最优滤波·····	145
4.6 模型跟踪法·····	149
习题·····	154
第五章 微控制器控制算法的结构设计 ·····	157
5.1 引言·····	157
5.2 应用并联、直接、标准形及串联结构的 递推计算·····	157
5.3 微型计算机的性能·····	166
5.4 天线抛物面的稳定——微控制器设计 举例·····	171
习题·····	191

第六章 数字算法的实现	192
6.1 引言	192
6.2 有限字长的二进制运算、数值误差的类型 及其在各种表示形式下的产生原因	193
6.3 量化噪声的产生和在系统中的传播	199
6.4 系数误差及其对控制器动态特性的影响	210
6.5 由量化、死区和极限环所引起的控制器的 非线性特性	214
6.6 模数转换器、存贮器、运算器和数模转换 器的字长	223
6.7 设计举例。数字自动驾驶仪的微处理机 实现	229
习 题	251
第七章 采样频率的选择	254
7.1 引言	254
7.2 附加状态和无用频率的预滤波	255
7.3 时间响应及外部噪声响应与采样频率的 关系	264
7.4 由采样引起的控制粗糙度	270
7.5 响应逼真度与采样频率	276
7.6 采样频率的实际选择	278
习 题	280
第八章 设计举例之一	282
8.1 引言	282
8.2 模拟方案	282
8.3 系统的离散模型和所需计算能力的估计	285

8.4 计算系统	293
习题	297
第九章 设计举例之二	299
9.1 引言	299
9.2 控制要求	299
9.3 各分系统的说明	300
9.4 控制器的设计	303
9.5 模数及数模转换器的选择	309
9.6 中央处理机CPU	310
9.7 控制器程序	312
习题	314
附录A 最优离散控制及一些计算方法	315
A.1 连续指标函数的离散化	315
A.2 离散调节器问题的一般表示法	316
A.3 最优调节器的解	317
A.4 用特征向量分解法求解离散里卡蒂方程	320
A.5 用特征向量分解法计算稳态最优滤波器	325
A.6 计算对外部噪声的稳态响应的算法	326
附录B 粗糙度函数	329
B.1 粗糙度函数的定义	329
B.2 外噪声扰动时, 闭环系统的平均粗糙度函数	332
附录C z变换和s变换表	334
参考文献	335
索引(中英对照)	338

第一章 理论基础

1.1 引言

本书论述以线性、定常、离散系统为模型的控制问题。理论部分的实例可能包含门限或限幅器之类的非线性元件，但是，假定系统的特性基本上是线性的和随时间缓慢变化的。对连续控制系统的数据进行线性采样的理论，在五十年代就已经发展起来了，这种理论在许多经典的教科书中都有所论述（见[RA-1]、[JU-1]）。不是由于采样数据理论，而是随着数字机应用的日益增加，促使人们对数值分析有强烈的兴趣，特别是对数值积分法、数据的内插、外插和滤波、以及用矩阵处理 n 维系统的状态空间和连续系统的离散模型化等方面。在过去的二百年中，数学家们提出的有关数值分析和线性代数的许多方法和理论，在五十年代和六十年代又被控制工程师和计算机科学家们重新提出来了。

为了把多变量数字控制理论和古典的单输入-单输出采样数据理论区分开，在本书中用“离散化”这个名词来代替采样这个名词。

离散或数字控制的数学理论与采样数据理论相似，所不同的只是前者包括纯离散系统。此外，多变量系统可很容易

地用线性状态空间法来研究。

由于上述原因,本章内容分为以下三部分:

- (i) 用线性差分方程描述的线性离散系统。
- (ii) 线性离散系统的 z 变换表示。
- (iii) 线性连续系统的离散化(采样),离散化系统的特性以及 s 平面与 z 平面之间的关系。

为了便于教学,在本章末尾的附录 1A 中,概略地介绍了有关采样数据理论。

1.2 线性、定常、离散系统

假定读者对线性系统理论的基本概念是熟悉的。

离散动态系统可以用下列方法来建立模型或表示:

- (i) 离散(或差分)方程。
- (ii) 脉冲响应。
- (iii) 传递函数。

1.2.1 系统

系统 S 把输入 u 转换成输出 x ,这可由图 1.1 所示的方块图来表示:

输入 u 是一串数, $u = \{u_0, u_1, \dots, u_i\}$, 输出也是一串数, $x = \{x_0,$

$x_1, \dots, x_i\}$ 。对于多维系统来说, u 和 x 都是向量。

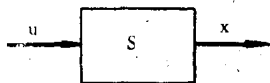


图 1.1 离散系统

通常,这个关系式可用下式来表示:

$$x = S(u) \quad (1.1)$$

式中 S 是定义系统的变换。

下面, 定义线性、定常及脉冲响应的概念, 传递函数的概念将在 z 变换这一节中介绍。

1.2.2 线性

如果满足叠加原理, 则系统的变换 S 是线性的, 即

$$x = S(au + bu') = aS(u) + bS(u') \quad (1.2)$$

在这种情况下, x 是 u 的线性函数。即 S 是线性算子。

1.2.3 定常

如果系统的响应与输入 u 的作用时刻无关, 则系统 S 是定常的。

如果以 i 和 k 表示无因次时间, 那么, 对于所有的 $k \geq 0$ 有:

$$S(u_{i-k}) = x_{i-k} \quad (1.3)$$

式中

$$u_{i-k} = 0 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, k-1)$$

1.2.4 脉冲响应

令 h_i 是系统 S 在 $i=0$ 时的单位脉冲响应, 则按照输入-输出关系, 如果有 $u_0 = \{1, 0, 0, \dots, 0\}$, 则:

$$x = S(u_0) = \{h_0, h_1, \dots, h_i\} \quad (1.4)$$

脉冲响应 h_i 表示了系统 S 的特性, 它的表示式可以用解析的方式或根据经验给出。

输入-输出关系是建立在线性叠加原理基础上的。

输出是各个单个脉冲响应之和。

$$x_i = \sum_{n=0}^i h_n u_{i-n} \quad (\text{注}) \quad u = \{u_0, u_1, \dots, u_i\} \quad (1.5)$$

(注) 原文中方程(1.5)为 $x_i = \sum_{k=0}^i h_k u_{i-k}$ ——译者。

x 是 u 的线性卷积。

例:

$$h_i = (0.1)^i$$

$$u_i = 1, 1, 1, \dots, 1$$

$$x_i = \sum_{k=0}^i (0.1)^k = \frac{1 - (0.1)^{i+1}}{1 - 0.1}$$

1.2.5 离散时间系统

所用的术语: t ——时间

i ——整数 $(0, 1, 2, \dots)$

T ——两个采样点之间的时间间隔

f_s ——采样频率

ω_s ——采样角频率

这些变量之间有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{1}{T} \\ \omega_s &= \frac{2\pi}{T} \text{ (弧度/秒)} \\ f_s &= \frac{1}{T} \text{ (赫)} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

下面通过一个例子来说明离散时间函数 $f(i)$ 。

$f(i)$ ——离散时间函数

$f(t)$ ——连续时间函数

$i = 0, 1, 2, \dots$

t ——连续变量

$$f(i) = 0.5i^2 + 2i$$

$$f(t) = \frac{0.5}{T^2} t^2 + \frac{2}{T} t$$

$f(i)$ 可由如下形式给定:

(i) 解析表示。例如 $f(i) = 0.5i^2 + 2i$

(ii) 表格表示。

例如：

i	0	1	2	3	4
$f(i)$	0	2.5	6	10.5	16

$f(i)$ 可以通过对连续函数进行采样而获得，或者也可以把它看成是纯离散现象。例如，每年事故的发生次数。

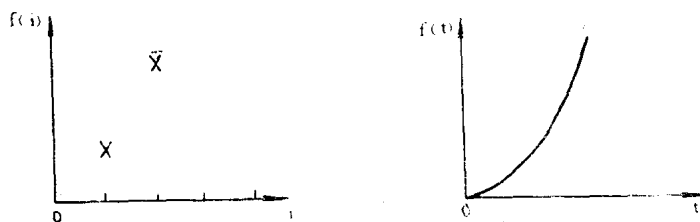


图 1.2 $f(i)$ —离散时间函数
 $f(t)$ —连续时间函数

在本书中， $f(i)$ 通常是对连续函数 $f(t)$ 进行采样得到的。也就是 $f(iT) = f(t)$ ，用一个简单的符号 $f(iT) \triangleq fi$ 来表示这个关系。有些文献中不用 i 而用其它的符号，例如 n 或 k 。在本书中， n 均为系统的维数。

1.3 有限差分的计算

有限差分的计算是一种解析法，它可以帮助我们离散系统进行计算、综合和分析。这种方法与描述连续动态系统的线性微分方程相似。本书所采用的计算方法的结构与微分

方程相类似。

这里，再次假定读者对线性微分方程和它们在 s 平面上的表示方法是熟悉的。为了使这种变换容易理解，总是把离散情况和连续情况进行比较。

1.3.1 离散方程

和微分方程一样，离散方程描述的是因变量 x 与自变量 i 之间的关系。外作用 u_i 和（或）初始条件 $x_0, x_1, \dots$ ，同时激励的系统。

离散方程的定义可由方程 (1.7) 表示：

$$b_0 x_{i+n} + b_1 x_{i+n-1} + \dots + b_{n-1} x_{i+1} + b_n x_i = u_i \quad (1.7)$$

式中 n 是方程（系统）的阶数。

一阶齐次离散方程具有如下的形式：

$$b_0 x_{i+1} + b_1 x_i = 0 \quad (1.8)$$

例：

x_i 为第 i 次计数时的细胞数。

B 是细胞的繁殖率， A 是细胞的死亡率。

下一个计数时刻可得出 $x_{i+1} = (B - A)x_i$ 。

故一阶离散方程为： $x_{i+1} + (A - B)x_i = 0$ ，而 x_0 为其初始条件。

二阶离散方程具有如下形式：

$$b_0 x_{i+2} + b_1 x_{i+1} + b_2 x_i = u_i \quad (1.9)$$

例：

求浮桥的总挠度。

一个有 m 段的浮桥，在 $i+1$ 段的挠度 x_{i+1} 取决于载荷 u_{i+1} 、弹性系数 k 及两相邻段之间的挠度（见图 1.3）， A 与扭转刚度成正比。