计算机

控制系统入门

——δ 算子的应用——

[日] 金井喜美雄
堀　憲　之　共著
张　　平　譯
高　金　源　审校

北京航空航天大学出版社

计算机控制系统入门

——δ算子的应用——

〔日〕金井喜美雄 堀 憲 之 共著
张 平 译
高 金 源 审校

北京航空航天大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统入门:δ算子的应用/张平译. —北京:北京航空航天大学出版社,1995.12

ISBN 7-81012-621-0

Ⅰ.计… Ⅱ.张… Ⅲ.计算机控制系统:数控系统-应用-δ算子 Ⅳ.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 18099 号

本书基于原著者及出版社的好意支持译成

デイジタル制御システム入門

——デルタオペレータの適用——

桢书店,东京,©1992

计算机控制系统入门

——δ算子的应用——

〔日〕 金井喜美雄 堀宪之 共著

张平 译

高金源 审校

责任编辑 王小青

北京航空航天大学出版社出版

北京学院路 37 号(100083) 2015720(发行科电话)

新华书店总店科技发行所发行 各地书店经销

[illegible]

*

850×1168 1/32 印张:5.5 字数:149 千字

1996 年 1 月第一版 1996 年 1 月 第一次印刷 印数:3000 册

ISBN 7-81012-621-0/TP·195 定价:7.30 元

版权号 图字:01-95-254 号

译 者 序

计算机控制系统或数字控制系统，近十多年来得到了广泛的应用和发展，在航空航天、工业自动化等国民经济各个领域起到了越来越重要的作用，与此同时，数字控制系统的分析及设计方法的研究也得到了特别的重视。

以 Z 变换为核心的采样系统理论，作为分析和设计数字控制系统的基本手段，今天已为人们所普遍接受。但 Z 变换作为基础理论和设计方法还存在一些不足之处。例如，对于只适用于小采样周期的系统的分析设计，它使离散系统的极点聚集在 Z 平面的 $z=1$ 点附近，使系统实现时产生较大的数值误差；对于最小相位的连续系统，Z 变换常常会引入一些不稳定零点，给系统设计带来困难；此外，在计算机字长较小时，将会引起较大的量化误差以及极限环振荡等非线性效应，从而使系统的稳定性及调节精度变差。以上种种都限制了 Z 变换方法的应用。

80 年代，澳大利亚著名的控制理论专家 Goodwin 教授的研究表明，采用 δ 变换的离散模型，将能较好地解决上述 Z 变换所出现的问题，引起了人们对 δ 变换的关注与重视。日本防卫大学从事飞行控制与自适应控制的著名学者金井教授，随后更全面地研究了 δ 变换的基本理论与应用方法，取得了较为系统的研究成果。他进一步指明，当采样周期较

小时，δ 域离散模型在数值上将接近连续域模型，从而使人们熟知的连续域的分析设计方法和经验可直接用于 δ 域的设计，避免了使用 Z 域离散模型所带来的上述问题。金井教授及其同事目前已将该方法用于汽车、飞机、导弹等计算机控制系统的设计中，在模型跟踪、自适应控制及优化控制等方面均有一定的应用研究结果。1993 年，金井教授等人所发表的关于 δ 变换的零极匹配离散模型的分析和设计的文章，获得了英国电气学会杂志控制方面唯一的 Kelvin 学术奖。

我国关于计算机控制系统 δ 变换方法的研究，除北京航空航天大学陈宗基教授等人于 1992 年在自动化学报上发表的有关论文外，还未见到全面系统论述 δ 变换方法的读物，相信本书的出版定会引起国内从事计算机控制系统研究与设计的技术人员的关注与重视。

本书较详细全面地讲述了 δ 变换的基本概念，δ 离散模型的各种形式与特点，以及各种设计方法等。作者将连续域、离散域的有关理论联系起来，较清晰地阐明了 δ 离散模型与 Z 离散模型的关系；在应用方面，除了传统的离散域直接设计及模拟化设计，还详细介绍了 δ 算子的模型匹配方法，该方法由于 Z 变换产生的非最小相位问题而在 Z 域无法使用。本书叙述简炼、通俗易懂，并配以一定的应用例题，便于阅读和自学；每章均列举了全面的参考文献，便于读者查找相关资料。翻译时为尊重原著格式，标题序号、图的标注保持与原文一致，未进行规范化处理。

本书是在日本防卫大学宇航系金井喜美雄教授和桢书店的佐藤恒雄先生的大力支持下得以在国内翻译出版的，

在出版之际，对他们的理解和支持表示衷心的感谢。北京航空航天大学高金源教授对本书的翻译给予了具体的指导和帮助，并审校了全书，在此深表谢意。北京航空航天大学出版社王小青副总编为本书的出版给予大力支持并做了大量细致的工作，对此也深表谢意。

限于译者的水平，译文中不够贴切或有误之处，热忱地欢迎读者批评指正。同时，本书若能起到抛砖引玉的作用，对国内从事计算机控制的专业人员有所启发和帮助，译者将感到高兴和欣慰。

译　者

1995 年 8 月

原著前言

近代的自动控制系统，以飞行控制系统为代表，在很大程度上依赖于计算机等数字式设备。由于控制算法是通过软件程序实现的，即使是相当复杂的运算，也可以简单快速地完成。所以，现今控制系统的设计是以数字计算机的使用为前提的，无论在何处都必定要使用系统的离散时间描述。

一般来讲，离散时间系统的采样频率越高，就越可以期望它与连续时间系统的动态特性一致。但在 Z 变换等传统的离散化方法中，若用高采样频率，最小相位系统的离散时间模型会变成具有不稳定零点的非最小相位系统，同时还会产生计算精度变差等问题。这些问题，虽然在数字式控制设备开发的初期就应当解决，但有关这类问题的论文直到最近才见到零星发表，而就更广泛的题目综合论述的著作，在国内可以说完全没有。

本书的目的，就是从离散时间系统常常与连续时间系统相关这一点出发，表明由连续系统得到的响应可以作为离散系统响应的延续来处理。本书的副标题“δ 算子”，就是为此目的使用的一种算子。引入这种算子，可以将离散时间描述与连续时间描述统一起来讨论，在高采样频率下也可得到比传统算子更好的结果。这一点，在计算机控制的应用方面确实产生了不少的影响。

本书是具体应用 δ 算子的计算机控制系统设计的入门书籍。它介绍了 δ 算子的有用特性、著者的设计思想等，同时收入了很多例题，内容上把离散系统与对应的连续系统统一起来进行处理，所以相信本书对那些关心计算机控制的学生和实际的控制系统设计者是有吸引力的。考虑到有些读者与作者的思路不同，作者也准备从读者那里接受反馈意见，必要时加以修改。本书如能使读者在对离散系统更深入地理解以及实用计算机系统的进一步开发方面有所帮助，则是作者意料之外的成功。

最后，对时常得到帮助指导的 Saskatchewan 大学的工学部长 Nikiforuk 教授表示感谢，并对协助发表本书的桢书店的佐藤恒雄先生致以深深的谢意。

著　者

1992 年 3 月

目　录

第一章　绪　论

第二章　δ 变换法

第三章　离散域算子与系统描述

第一章 绪　论

1.1 数字计算机控制

实际的控制对象如飞机、汽车等都是用连续时间系统表示的，但目前，控制器的设计是以数字计算机的使用为前提的，所以一定要在某些地方用离散时间表示。一般采用的方法包括：数学模型用连续时间表示、设计模拟控制器进行数值计算时再离散化的方法（模拟化法）；或数学模型用离散时间表示、设计离散控制器的方法（直接数字法）；或二者混合的方法。这样在数字控制器中要处理几种不同的信号，首先简要地从概念上加以说明。图 1.1 表示了数字控制器中的三种常用信号。由于信号的名称可以有几种不同的定义，为避免混乱本

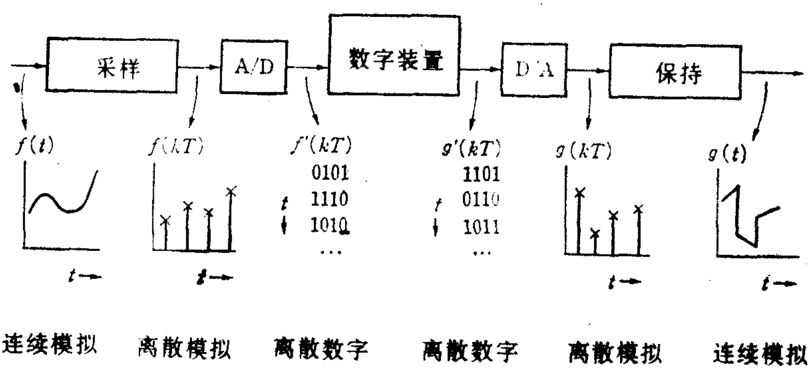


图 1.1 信号的种类

书约定如下。信号是由时间和幅值来表示的。首先从时间上可分为连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号不论在任何时刻都可以定义信号值，而离散时间信号只在某个确定的时刻（采样时刻）有意义。在采样时刻读取连续信号形成的离散信号叫作采样值信号。在这种情况下，虽然只在采样时刻信号才被定义，在设计控制系统时，还应当注意原连续信号采样点间的信号值。这是极重要的，它与采样周期的确定有很大关系。

其次，从幅值的角度来观察信号，可分为模拟信号和数字信号。模拟信号一般指电压等物理量。这类信号，使用电子线路及模拟计算机等可以利用已有的技术很容易地进行处理。理论上它们虽然可以取任意值，但由于受到噪声、饱合及其他材料性能的影响，实际上得到某种程度的高精度是不可能的或代价太高。然而在很多时候常要求高精度以达到通常的控制目的。数字信号是用有限位数表示的量化信号（实际上是二进制数码）。例如，若用一位数字信号表示由 0 到 1 范围内的模拟信号，则无法区别 0.5 以上或 0.5 以下两种状态的模拟信号幅值。若取 2 位可得到 4 个数，取 3 位可得到 8 个数，这样随着位数的增加可以区分得更细。模拟信号具有正负符号时情况也基本相同。图 1.2 是这种量化的一个例子。图上±0.05 内的模拟信号用数字信号表示时全部为 0。若各位上的信号是用 1 或 0 表示的物理量，这时问题不在于实际值本身，而仅仅在于该信号比某个值大还是小。因此可以说数字信号比模拟信号抗噪声能力强。然而，在用多位数表示一个信号时，信号的分辨率取决于位数。例如，为达到 0.1%以上的精度至少要 10 位。与模拟式设备相比，数字控制的处理速度要慢一些，还要使用附加的信号变换器。但其优点是数据容易保存，利用微处理器或数字计

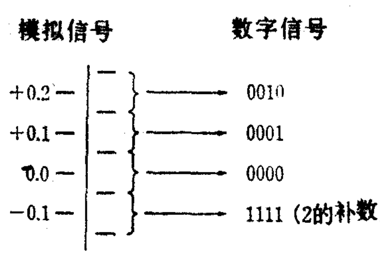


图 1.2　一个量化的例子

算机可以进行复杂的运算，算法的变更也较为简单。随着计算机技术的进步，数字控制的应用变得越来越广泛了。

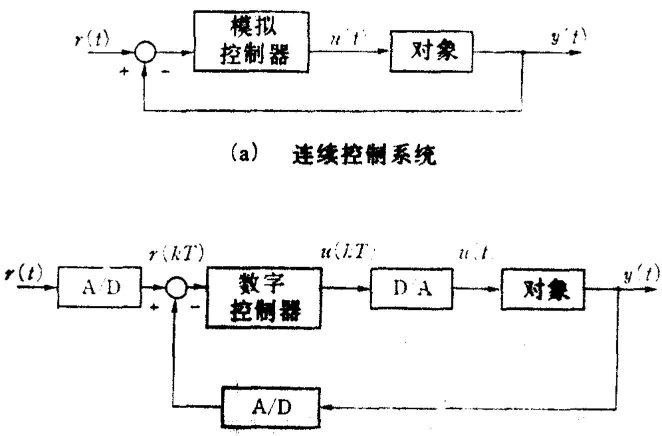
下面再看图 1.1。在控制领域中被控制的系统（对象）一般是时间连续的模拟信号系统，在某个确定的时刻从中取出各个离散时刻的模拟信号，即采样值信号（采样），并将其变为量化的二进制数码的离散时间数字信号（A/D；模拟/数字），实际使用的 A/D 变换器具有上述两个功能。数字计算机利用这类信号产生另外的信号（如控制信号）。由于量化的数字信号不能直接加到被控对象上，首先要将这种信号变为时间离散的模拟信号（D/A；数字/模拟），再将其变为连续时间信号（保持）加在对象上。实际上一般的 D/A 变换器是完成上述两个功能的装置。本书用 $f(t)$ 表示连续时间信号，对它进行采样，在采样周期 T 上得到的离散信号用 $f(kT)$ 或更简单用 $f(k)$（$k=0,1,2,\cdots$）表示。$f(t)$ 和 $f(k)$ 虽为不同的信号（函数），但为简化起见不作特殊的区别。请注意，$f(kT)$ 和 $f(k)$ 不一定表示 $f(t)$ 在 $t=kT$ 时的值[①]。将 $f(kT)$ 离散化得到的是经过量化编码的信号 $f'(kT)$，它在物理上虽然与 $f(kT)$ 不同，但如果量化影响很小，在处理时可看作是相等的。本书的大部分地方不考虑量化的影响，所以不专门地区别 $f'(kT)$ 和 $f(kT)$。另外，采样周期 T 的倒数 $1/T$ 叫作采样频率 f_s，$2\pi f_s$ 叫作采样角频率 ω_s。当采样频率很高时，可以期望离散时间信号具有与连续时间信号相近的特性（详细说明见第四章），但受到硬件方面的限制，所以采样频率有其上限。反之，若对连续信号采样较慢的话，离散信号不能保持原信号的真实信息，所以采样频率又存在下限[②]。采样频率的取值极其重要，在 5.4 节将专门叙述。

图 1.3 表示了一个闭环模拟控制器与数字控制器相对应的例

---

① 本书用 $f(t)|_{t=kT}$ 表示 $f(t)$ 在 $t=kT$ 的值。

② 采样频率要取连续信号所有重要频率中的最高频率的 2 倍以上的值。同时，由于被采样的连续信号可能含有噪音或其他不重要的频率成分，采样前必须先用滤波器将其滤掉。



(a) 连续控制系统

(b) 数字控制系统

图 1.3 模拟控制系统和数字控制系统

子。A/D 变换器前面通常要加上模拟滤波器,这里省略了。工程实现的控制器都要用 A/D 和 D/A,而若不考虑量化影响,在进行分析或设计时,常可以使用不同的采样器和保持器(也叫做分离采样)。可以首先设计模拟控制器,将其进行时间离散化得到数字控制器。这时可以使用迄今为止已知的各种连续域方法设计控制系统,一旦设计结束,对各种不同的采样周期求离散控制是很简单的。进一步对系统不同部分取相异的采样周期,实现多采样速率控制也是有利的。它的问题在于用传统方法设计时,必须将控制律用相当高的采样频率离散化。解决该问题的较为简单的方法是基于模拟化的设计方法,在第七章将详细论述。另外,由于自适应控制等有些相当复杂的连续控制律,简单地离散化后,有时离散系统会变得不稳定,所以为确保离散域的稳定性,必须仔细进行控制律设计。第六章讲到的直接数字化法,不在连续域进行设计,而是首先求出对象的离散模型,在此基础上在离散域设计控制系统。它的关键是要在控制器设计前确定采样周期,原因是采样周期的确定一般依赖于包括控制器在内的闭环系

统特性。例如一个连续信号在采样时刻稳定，但在采样点间有时会振荡，甚至发散。这时必须改变采样周期、重新设计，或改变控制方式。要注意，用这种方法容易习惯于只在离散域中考虑问题及进行设计。重要的是，应当记住设计虽然在离散域内进行，但被控制的对象却是连续的。

不论使用哪种方法，都希望能够较容易地将离散域和连续域的结果联系起来。能达到这一点的一个系统描述称之为 δ 算子，下一节将加以介绍。

1.2 δ 算子的必要性

本节的目的是用简单的例题说明使用 δ 算子的优点，不涉及 Z 变换的概念。这些概念要在第二章中重新定义，这里不再详细讨论，只给出一些结果。

连续系统在时间域内的描述一直使用微分算子 d/dt，在拉普拉斯变换域（频率域）中用 s 算子。与其对应的离散系统描述到目前为止一直使用移位算子 q 及其变换域中的 z 算子。下节将要讲到，移位算子 q 定义为

$$qf(k) = f(k+1) \tag{1.1}$$

在 Z 变换域中叫作 z 算子。作为离散系统的描述，本书主要利用 δ 算子及在 Δ 变换域中的欧拉算子 ε。

δ 算子[①] 定义为

$$\delta = \frac{q-1}{T} \tag{1.2}$$

用 δ 算子表示时，采样周期 T 越接近 0，离散系统越接近连续系

① 严格区别时域移位算子 q 和变换域算子 z 虽有必要但却并不常见。本章无特别要求时只用 z 算子。δ 算子和 ε 算子也同样，用 δ 算子。第二章以后根据需要有时加以区别，无事先需要时可以同样考虑。