

高等院校教材

数字控制

——建模与分析、设计与实现

(第二版)

徐丽娜 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

数字控制
——建模与分析、设计与实现
(第二版)

徐丽娜 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书共 13 章。主要内容有:第 1 章绪言;第 2~4 章线性数字控制系统的建模与分析;第 5~8 章数字控制系统设计的两类方法;第 9、10、12 章数字控制系统的设计与实现;第 11 章快速采样数字控制系统;第 13 章 Matlab 应用实例。

本书可作为高等工科院校自动控制、工业自动化、探测制导与控制技术等专业高年级本科生、相关学科研究生的教材或教学参考书,也可供从事计算机控制系统设计、应用的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字控制:建模与分析、设计与实现/徐丽娜编著。—2 版。—北京:科学出版社,2006

(高等院校教材)
ISBN 7-03-017082-2

I. 数… II. 徐… III. 数字控制-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 027184 号

责任编辑:马长芳 潘继敏 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1991 年 9 月哈尔滨工业大学出版社第一版

2006 年 6 月第 二 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 6 月第一次印刷 印张: 20

印数: 1—3 000 字数: 380 000

定价: 35.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

本书阐述线性定常数字控制系统的建模与分析、设计与实现问题。

由于数字控制系统中的数字控制器是用数字计算机实现的，因此，数字控制也称为计算机控制。

数字控制系统的基本特征是采样，也是与连续控制系统的主要不同之处。本书主要讨论采样周期为常值的数字控制问题，并从多方面分析了其对数字控制系统性能的影响。

本书注重理论与实践相结合，在论述理论的基础上，配以相应的例题，便于读者理解与掌握。

书中有些内容是作者多年从事数字控制教学与科研实践的总结。

本书第一版于1991年9月由哈尔滨工业大学出版社出版。

《数字控制——建模与分析、设计与实现（第二版）》是根据作者十几年的教学体会和科研成果，对第一版进行修改、补充而成的，其中增加了快速数字控制系统的章节，融入了Matlab的应用。

书中所附的光盘是计算机辅助教学系统——数字控制课件，由张广莹副教授编制，在教学中应用获得了很好的效果，此次同本书配套出版，将成为“教”与“学”很好的辅助教材。

本书第二版的编写得到了哈尔滨工业大学的资助，在此表示感谢。

由于作者水平所限，缺点与错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2006年4月

目 录

前言

第 1 章 绪言	1
1.1 数字控制系统概述	1
1.2 数字控制对计算机(系统)的要求	4
第 2 章 采样过程与信号重构	7
2.1 引言	7
2.2 采样过程	8
2.3 采样定理.....	11
2.4 信号重构.....	13
2.5 采样周期的选择.....	19
第 3 章 线性离散系统的数学描述	20
3.1 引言.....	20
3.2 线性常系数差分方程.....	20
3.3 脉冲响应与卷积和.....	24
3.4 Z 变换.....	25
3.5 脉冲传递函数.....	33
3.6 离散状态空间表达式.....	37
第 4 章 数字控制系统建模与分析	46
4.1 引言.....	46
4.2 改进 Z 变换	47
4.3 带零阶保持器的连续对象的 Z 传递函数	50
4.4 数字控制系统闭环 Z 传递函数	57
4.5 连续状态方程的离散化.....	62
4.6 零极点分布与系统的动态响应.....	65
4.7 稳态误差分析.....	75
4.8 系统频率响应特性.....	79
4.9 稳定性分析.....	82
4.10 二阶系统分析例	88
4.11 扰动对系统的影响	93
第 5 章 数字控制系统的连续-离散化设计	97
5.1 引言.....	97

5.2	数字滤波器法	98
5.3	匹配 Z 变换	105
5.4	系统设计例	108
5.5	数字PID控制	112
第6章	数字控制系统的离散化设计——Z域法	122
6.1	引言	122
6.2	有限拍控制系统设计	123
6.3	有限拍无振荡控制系统设计	127
6.4	根轨迹法	133
6.5	对象具有时延的控制系统设计	136
6.6	直接设计法	139
6.7	复合控制系统设计	141
6.8	小结	143
第7章	数字控制系统的离散化设计——状态空间法	146
7.1	引言	146
7.2	能控性与能观测性	146
7.3	状态反馈极点配置调节系统设计	155
7.4	状态观测器设计	158
7.5	有观测器的状态反馈调节系统	164
7.6	有输入的系统设计	169
7.7	小结	175
第8章	最优设计方法——状态空间法	177
8.1	引言	177
8.2	最优调节系统设计	177
8.3	有输入的系统设计	185
8.4	最优随机控制	186
8.5	小结	194
第9章	数字控制系统的硬件结构	195
9.1	引言	195
9.2	微型计算机	195
9.3	模拟输入/输出通道	200
9.4	开关量输入/输出接口	207
9.5	实时时钟	213
第10章	数字控制器的实现	217
10.1	引言	217
10.2	控制器的运算结构	217

10.3	量化误差	222
10.4	A/D 转换量化分析	226
10.5	运算过程量化分析	231
10.6	系数量化分析	236
10.7	溢出与计算时延	241
10.8	字长的选择	242
10.9	小结	244
第 11 章	快速采样数字控制系统	245
11.1	引言	245
11.2	δ 变换	246
11.3	基于 δ 变换的系统描述与分析	253
11.4	基于 δ 变换的系统设计	258
11.5	基于 δ 变换的量化分析	260
第 12 章	数字控制系统的设计与实现	264
12.1	实时软件设计的几个问题	264
12.2	高精度角位置伺服系统	267
第 13 章	Matlab 应用实例	277
例 M-1	由 Z 传递函数, 求在典型信号作用下的响应 (1)	277
例 M-2	由 Z 传递函数, 求在典型信号作用下的响应 (2)	278
例 M-3	由信号的 Z 变换, 求 Z 反变换	280
例 M-4	模拟到数字滤波器的转换: 脉冲不变法	280
例 M-5	模拟到数字滤波器的转换: 梯形积分 (双线性变换)	281
例 M-6	PID 控制系统分析	282
例 M-7	由 Z 传递函数求频率特性	285
例 M-8	模拟与数字滤波器的频率特性	286
例 M-9	画根轨迹图	290
例 M-10	求连续系统的离散化状态方程	292
例 M-11	变分法设计线性二次型调节器 (1)	292
例 M-12	变分法设计线性二次型调节器 (2)	294
思考与练习		297
参考文献		305
附录	拉普拉斯变换和 Z 变换	306

第 1 章 绪 言

数字控制系统 (digital control system) 是以数字计算机作为数字控制器, 实现对连续对象 (或过程) 的闭环控制, 因此也可以称为计算机控制系统。

本书阐述如下几部分内容:

(1) 数字控制系统的建模与分析。讨论线性数字控制系统中各环节及闭环控制系统模型的建立, 分析控制系统的稳定性、动态与稳态特性、频率特性。

建立作用于系统的扰动模型, 分析其对控制系统的影响。

线性离散时间系统理论是分析数字控制系统的基础。

(2) 数字控制系统的设计 (或称综合)。在已知对象特性 (模型) 的前提下, 设计数字控制器, 使控制系统达到要求的动态与稳态性能。本书给出了连续-离散化与离散化两类中的多种设计方法。

(3) 数字控制系统的实现。硬件配置与实时控制软件设计; 由于量化引进误差, 即有限字长效应, 也就是讨论数值精度问题。

(4) 高速采样数字控制系统的建模与分析、设计与实现。

采样是数字控制的基本特征, 也是与连续控制的主要区别。采样周期 T 是数字控制系统的重要参数, 对其性能的影响是多方面的, 例如, 稳定性、动态特性、数值精度等。因此, 在分析、设计、实现数字控制系统时, 要特别关注采样周期这一参数及其对控制系统的影响。

本书讨论的是采样周期 T 为常值情况下, 线性数字控制系统上述几方面的问题。

1.1 数字控制系统概述

1.1.1 数字控制系统的组成与功能

数字控制系统由硬件与软件两大部分组成。

1. 硬件部分

数字控制系统的硬件由五部分组成, 以单输入单输出 (SISO) 单位反馈控制系统为例, 见图 1-1-1。

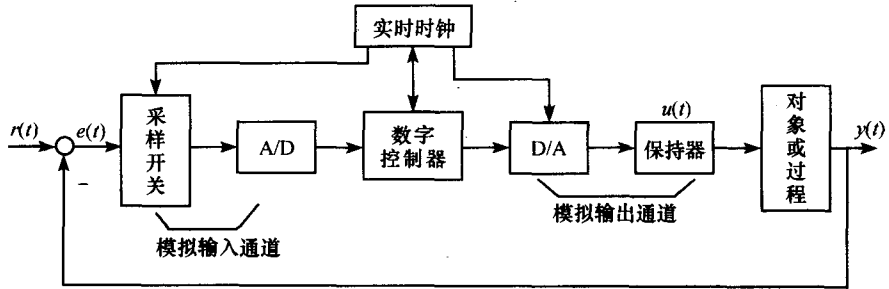


图 1-1-1 单输入单输出单位反馈数字控制系统硬件框图

- (1) 连续被控对象（或过程）：工作于连续状态，输入输出是连续量。
- (2) 数字控制器：工作于离散状态，输入输出是数字量，由数字计算机实现。
- (3) 模拟输入通道：由采样开关、A/D 转换器两个环节组成，完成由连续量到数字量的转换。
- (4) 模拟输出通道：由 D/A 转换器、保持器两个环节组成，完成由数字量到连续量的转换。
- (5) 实时时钟：产生脉冲序列，定时控制采样开关的闭合，控制 D/A 转换器的输出。

2. 软件部分

软件流程见图 1-1-2，数字控制器（数字机）通过软件实现所设计的控制规律（控制算法），控制软件主要由主程序和控制子程序组成：

(1) 主程序之功能是进行系统初始化设置。

(2) 控制子程序主要为数据采集、控制算法、控制量的输出和存储三部分，每部分执行程序需要的时间各为 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 。

数字控制系统的功能：

在数字计算机控制下，每经过一定的时间间隔 T （采样周期），对连续偏差信号进行采样，由模拟输入通道转换成数字量送入计算机中，计算机（数字控制器）根据这些数字信息按预定的控制规律（数学模型）进行运算后求得控制量输出，由模拟输出通道转换成连续量去控制对象（或过程），使系统的动态、稳态特性达到预期的指标。

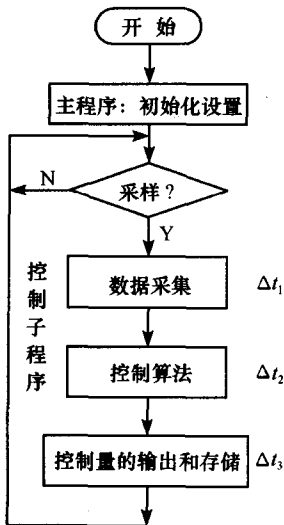


图 1-1-2 数字控制系统软件流程

在工业生产过程中，用计算机代替常规调节器，即模拟技术直接被数字技术所代替。为了强调计算机直接控制生产过程这一特征，将其称为直接数字控制(direct digital control, DDC)，图 1-1-3 为 DDC 系统示意图。在系统中，计算机可对多个被控量（如温度、压力、流量等）进行巡回检测并实现分时控制，具有很好的经济性。

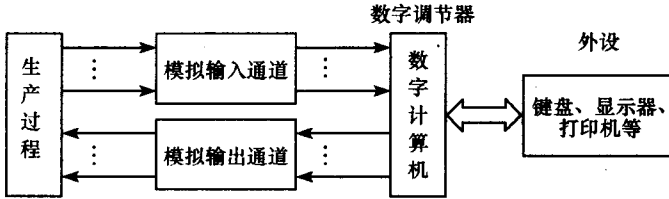


图 1-1-3 DDC 系统示意图

图 1-1-1 数字闭环控制系统由于采用了负反馈，使系统的响应对外部干扰、对系统内部参数的变化相当不敏感，这一点与连续闭环反馈控制有相同点；不同的是，数字控制系统只根据采样时刻，即离散时间点上的过程变量值进行工作，也就是在采样时刻之间，系统是在开环状态下运行的。

1.1.2 数字控制的优点

与连续控制比较，数字控制具有如下优点：

(1) 程序控制：数字计算机按照所设计的控制规律进行运算求得控制量的过程，实质上就是数字信息的加工处理过程，它是由程序（软件）来实现的，若改变控制规律，只需改变软件，而不必改变系统的硬件结构，这是比较方便的。

(2) 精度高：在连续控制系统中，控制器的精度由元件的精度而定，元件的精度达 10^{-3} 已很不容易。数字控制器精度由字长决定，从理论上讲，字长可达任意长度，但在实际系统中，可根据系统要求的精度确定字长。

(3) 稳定性好：在连续控制系统中，控制器的稳定性依赖于所选用的元件的稳定性，元件的参数易随环境的变化而改变，如电阻、电容等都有一定的温度系数。数字机用“0”和“1”的组合表示数字量，因此稳定性要好得多。

(4) 软件复用：具有相同数学模型的控制环节，在连续控制系统中，需用相同的硬件环节实现。数字控制是程序控制，只要设计和编写实现其模型的子程序模块，通过调用方式，既可方便地复现多个相同的环节，且不仅可在同一系统中，也可在不同系统中应用。

(5) 分时控制：数字计算机的输入、输出通道若分别配置多路及反多路开关(multiplexer-demultiplexer switch)，可组成多路模拟输入/输出通道，见图 1-1-4，

此时数字机可按照一定的次序分时采集、处理、输出不同通道的信息，实现分时控制。因此，一台计算机既可实现对同一系统不同变量的控制，也可分时控制不同的系统。

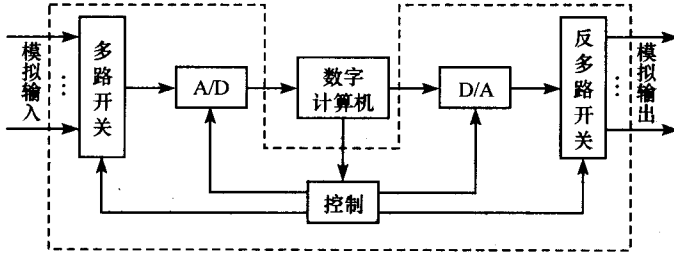


图 1-1-4 多路模拟输入/输出通道示意图

1.2 数字控制对计算机（系统）的要求

1.2.1 实时控制

数字控制必须实现实时控制 (real-time control)，也就是数字控制器要在一个采样周期 T 时间内完成一个控制步的操作，因操作是由执行程序实现，程序是由若干条指令组合而成，任何一条指令的运行都是需要时间的。

(1) 单输入单输出 (SISO) 数控系统，见图 1-1-1 与 1-1-2，完成一个控制步的操作。

① 数据采集：采集一个输入通道的数据，需经信号采样，A/D 转换后，数字量输入至计算机中，设需要时间 Δt_1 ；

② 按照所设计的控制规律，由程序求得控制量，设需要时间 Δt_2 ；

③ 控制量的输出和存储，设需要时间 Δt_3 。实现实时控制的基本条件为

$$T \geq \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \tag{1-2-1}$$

(2) 多输入多输出 (MIMO) 系统，实现实时控制的基本条件

$$T \geq \sum_{i=1}^n (\Delta t_{i1} + \Delta t_{i2} + \Delta t_{i3}) \tag{1-2-2}$$

式中， n ： n 输入 n 输出系统。

因此，数字控制系统又称为实时控制系统 (real-time control system)。

式 (1-2-1)、式 (1-2-2) 仅是最基本的条件。实际上，系统在运行时，还需要每隔一定的时间，实时显示与打印有关信息，设计者在确定采样周期 T 时，这些因素也应一并考虑。

1.2.2 对计算机（系统）的要求

为实现实时控制，数字控制系统中的计算机（系统）需要有相应的硬件与软件予以支持。

1. 硬件支持

用于数字控制的计算机（系统）需如下几部分硬件，见图 1-2-1。

(1) 计算机中的中央处理单元（CPU）要有较丰富的指令系统和较完善的处理中断的能力，前者能够减轻设计和编写控制程序的工作量，后者包括能为多个外设服务、解决优先权问题及迅速处理故障的能力。

(2) 要有实时时钟：实时时钟（real-time clock）为系统提供一个规则的脉冲序列，脉冲之间的时间间隔可作为时间基准，以便为系统提供按一定的时序进行操作的信号，例如，采样周期 T 就可由实时时钟来确定。

(3) 要有一定的内存容量（ROM 和 RAM）和外存设备（如硬盘驱动器），用以存放系统软件、控制软件。

(4) 需配置模拟输入/输出通道，在工业过程控制系统中也被称为过程通道。

(5) 配置与操作者的接口：键盘、显示器、打印机，使操作者可方便地设置、修改、调整参数，同时将系统的工作状态显示和记录下来。

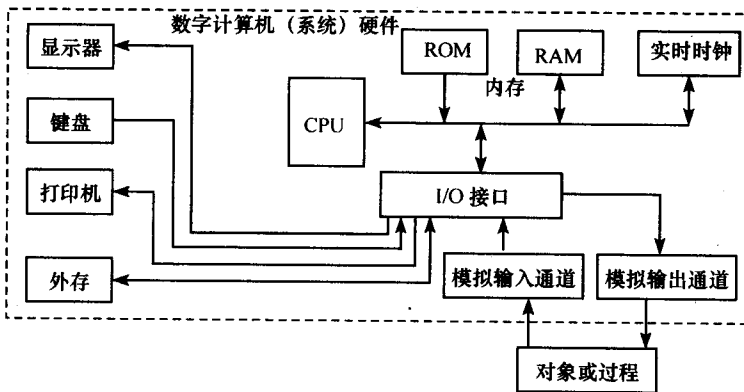


图 1-2-1 数字控制系统硬件框图

2. 软件支持

控制软件的输入、编辑、调试、修改、运行等都离不开系统软件的支持，系统软件应包括以下几个部分：

(1) 语言翻译程序：将输入至计算机中的控制源程序译成计算机能够运行的

目标程序。

(2) 服务程序：包括编辑、调试、连接等软件。

(3) 子程序库：一般计算机系统提供若干子程序（库），可供用户调用。有些子程序会给设计和编写控制软件带来很大的方便。

3. 人机对话功能

操作人员需要通过键盘与 CPU 进行对话，包括检查系统的运行情况、输入或修改控制参数、发生紧急情况时可由人进行干预等。这些功能需要上述相应的硬件和软件予以支持，例如，键盘、显示器、可供调用的具有对话功能的子程序（库）等。

用于数字控制系统中的计算机多种多样。自 1971 年 Intel 4004 型 4 位微处理机问世以来，不断有新型微处理机推出，因此，以微处理机为核心的微型计算机（系统），由于其性能的不不断提高和功能的日趋完善，并具有体积小、重量轻、价格便宜等优点，在控制系统中得到越来越广泛的应用。

本书讨论的是微型计算机（系统）用于数字控制系统的实现问题。

第 2 章 采样过程与信号重构

2.1 引言

由于数字计算机的离散时间性质，故采样 (sample) 是数字控制系统的基本特征。在此，将图 1-1-1 用图 2-1-1 表示，画出各环节输入输出信号一例。

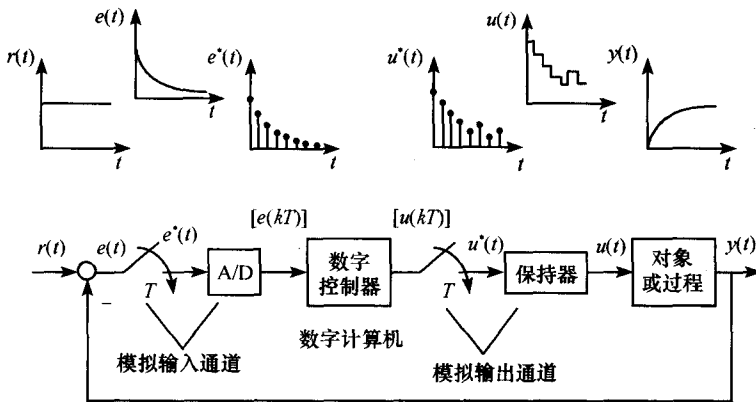


图 2-1-1 数字控制系统信号转换示意图

连续偏差信号 $e(t)$ 经采样开关进行采样，成为离散时间信号 $e^*(t)$ ，这一过程称为采样过程。之后，由 A/D 转换为计算机能接收与处理的数字信号序列 $[e(kT)]$ 。

$[e(kT)]$ 经控制算法后，输出的控制量 $[u(kT)]$ 是一个新的数字序列，由 D/A 转换为离散时间信号 $u^*(t)$ ，经保持器后成为连续时间信号 $u(t)$ 。由 $u^*(t)$ 到 $u(t)$ 这一过程称为信号重构 (signal reconstruction)。可见，信号重构是采样过程的逆过程。

分析与设计时，数字控制系统的简化：

(1) A/D 转换也称量化 (quantization)，是一近似过程，引进量化误差。在系统实现的过程中，可选定相应的字长，使量化误差在系统精度允许的范围内。因此，在分析与设计数字控制系统时，不考虑量化误差。量化误差的影响在本书关于数值问题分析的 第 10 章予以阐述。

(2) 控制算法是由程序实现的，因此，数字控制器 (计算机) 的输入、输出是在不同的时刻，也就是输出存在计算时延。但在系统分析与设计时，把信号看成是同一时刻输入、输出的，用 $[e(kT)]$ 、 $[u(kT)]$ 表示，因此，在图 2-1-1 中，

两个采样开关是同步闭合的。

(3) D/A 转换也有误差，在系统分析与设计时予以忽略。

鉴于在系统分析与设计过程中忽略上述三方面的影响，故将图 2-1-1 简化为图 2-1-2。

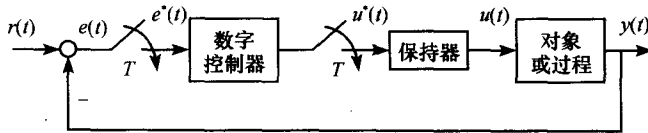


图 2-1-2 数控系统简化框图

由于采样是数字控制的基本特征，因此，需对采样过程的机理进行深入分析。采样理论包含单速率采样、多速率采样等不同采样类型。本书仅讨论单速率采样系统，即采样周期 T 为常数的情况。

本章主要讨论两个问题：

- (1) 采样过程、信号重构机理及其数学描述。
- (2) 采样定理及采样周期的选择。

2.2 采样过程

见图 2-2-1，设采样开关每隔一定时间 T （采样周期）闭合一次，闭合时间为 τ ，则连续信号 $f(t)$ 经采样后的输出为 $f^*(t)$ ，它是一个采样脉冲序列。

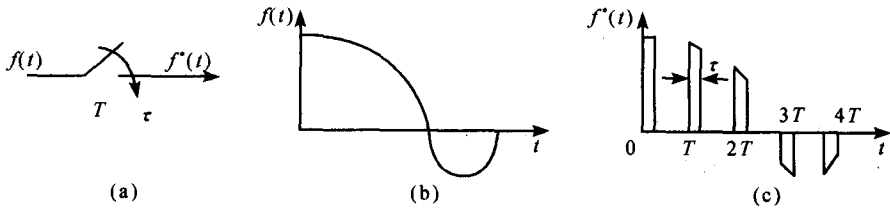


图 2-2-1 采样过程

(a) 采样开关 (b) 输入信号 (c) 输出信号

连续信号经过采样开关后，变成脉冲序列的过程称为采样过程 (sampling process)。

下面从时域、频域两方面对采样过程进行分析并予以数学描述 (或称建模)。

2.2.1 时域描述

由图 2-2-1 可知，连续信号 $f(t)$ 经采样后，用下式表示：

$$f^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(kT + \Delta t), \quad 0 < \Delta t \leq \tau \quad (2-2-1)$$

当采样开关闭合时间 $\tau \ll T$ ，且 T 远小于系统连续部分惯性时间常数（一般数字控制系统可以满足上述两条条件），可将采样开关看成理想采样开关，则信号 $f(t)$ 经过理想采样开关成为脉冲序列 $f^*(t)$ 的过程称为理想采样过程，见图 2-2-2。

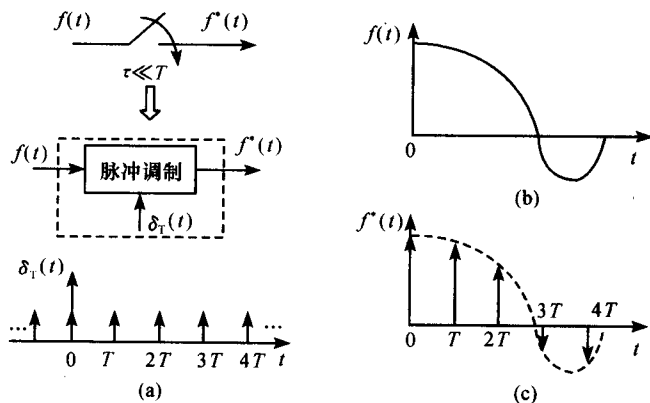


图 2-2-2 理想采样过程

(a) 理想采样开关 (b) 连续输入信号 (c) 输出信号

理想采样过程相当于脉冲调制过程，见图 2-2-2 (a)。调制器产生的脉冲序列信号为

$$\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT) \quad (2-2-2)$$

式中， $\delta_T(t)$ ：在 $t = kT$ 时刻具有单位强度的理想脉冲序列， δ 函数 $\delta(t)$ 为

$$\begin{cases} \delta(t) = \infty, t = 0; & \delta(t) = 0, t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \quad (2-2-3)$$

$f(t)$ 经 $\delta_T(t)$ 调制后的输出 $f^*(t)$ 是一个脉冲序列

$$f^*(t) = f(t)\delta_T(t) = f(t) \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT) \quad (2-2-4)$$

由于 $t \neq kT$ 时 $\delta_T(t) = 0$ ，因此式 (2-2-4) 可用下式表示：

$$f^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(kT)\delta(t - kT) \quad (2-2-5)$$

式中， $f(kT)$ ： $f(t)$ 在采样时刻的值，可看作对 $\delta_T(t)$ 的加权。式 (2-2-5) 是理想采样过程的数学模型，是时域描述。

从物理上看，理想采样开关相当于一个脉冲调制器，式 (2-2-5) 描述的采样过程可看作连续信号 $f(t)$ 被 $\delta_T(t)$ 调制的过程，得到理想采样序列 $f^*(t)$ ，见图 2-2-2 (c)。

若 $t < 0$ ， $f(t) = 0$ ，则式 (2-2-5) 为

$$f^*(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} f(kT)\delta(t-kT) \quad (2-2-6)$$

由以上分析可知，对连续信号采样意味着用采样时刻的值来代替该信号。

2.2.2 频域描述

下面对理想采样过程进行频域分析。

1. 采样前连续信号 $f(t)$ 的频谱

$f(t)$ 的频谱即是它的傅里叶变换

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2-2-7)$$

则式 (2-2-7) 的傅里叶逆变换为信号 $f(t)$ ，且

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega t} F(j\omega) d\omega \quad (2-2-8)$$

设其上限频率为 ω_m ，具有图 2-2-3 (a) 的形式。

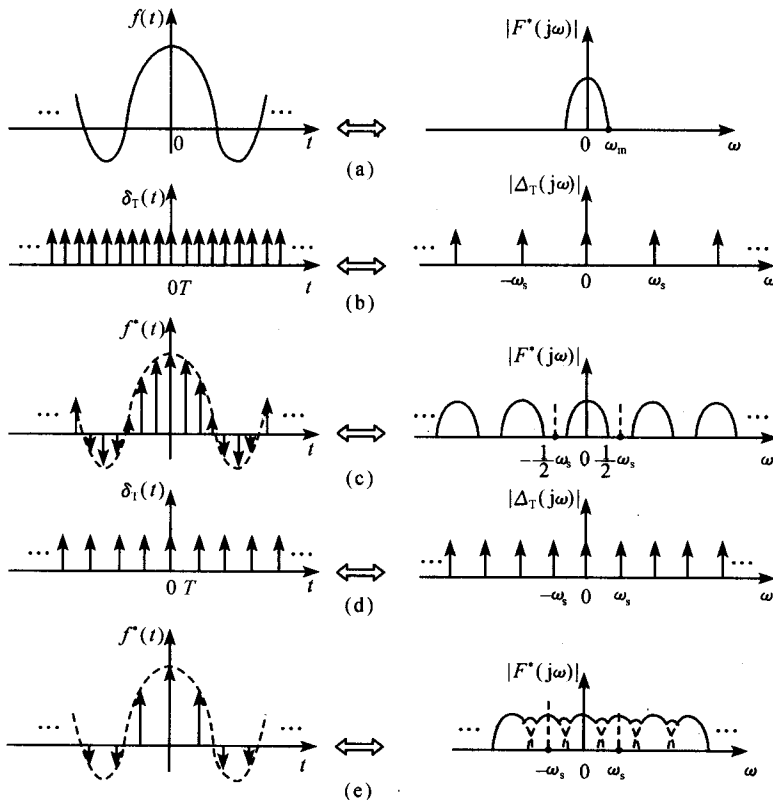


图 2-2-3 理想采样过程频域分析

(a) 输入信号及频谱 (b)、(d) 不同采样周期的调制信号及频谱 (c)、(e) 不同采样周期的输出信号及频谱