

• 奚柏清 编著

邮电高等学校教材

开关电容网络的 分析和设计

人民邮电出版社

TM: 6
x 06

360926

邮电高等学校教材

开关电容网络的分析和设计

奚柏清 编著



人民邮电出版社

登记证号(京)143号

EA15/08
内 容 提 要

本书介绍开关电容网络的分析和开关电容滤波器的设计方法及其应用。全书共五章。第一章介绍开关电容网络的基本知识；第二章介绍开关电容网络分析；第三章和第四章介绍开关电容滤波器的设计；第五章介绍开关电容网络的应用。

本书可作为大专院校无线电技术、通信工程、信号处理、自动控制专业的研究生和高年级选修课教材，也可供有关工程技术人员参考。

邮电高等学校教材

开关电容网络的分析和设计

奚柏清 编著

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：850×1168 1/32 1992年10月 第 一 版
印张：8 16/32 页数：136 1992年10月河北第1次印刷
字数：225千字 插页：1 印数：1—1500 册

ISBN 7—115—04738—3/G·186

定价：2.90 元

前 言

随着MOS大规模集成技术的迅速进展,近十余年来出现了开关电容网络这门新兴学科,以及单片集成开关电容滤波器的问世,使它在电话、脉冲编码调制通信、信息处理等技术中得到了广泛的应用,并进一步被扩展到非滤波应用的领域,使单片模拟信号处理成为可能。

随着开关电容网络在分析和设计方法方面趋于成熟,国内各大专院校相继开设了开关电容网络课程。本书是为适应这种形势需要而编写的一本教材。

本书第一章是有关开关电容网络的一些基本知识,主要为频率变换。第二章介绍分析方法,包括等效电路法、状态变量法、修正节点法。第三章介绍级联型高阶滤波器的设计。第四章介绍无源梯形的开关电容有源模拟,特别讲叙了采用预补偿的双线性跳耦滤波器的设计。第五章为开关电容网络的应用。在开关电容网络的设计方面需要考虑的问题很多,但诸如各种频率变换的优劣、灵敏度、寄生电容和运算放大器实际特性的影响等问题是关键所在。

在学习本课程以前,必须先学习“信号与系统”“网络理论”“电子电路”等课程。本课程约需60学时。

由于编者水平有限,书中定有许多不妥之处,敬希读者批评指正。

奚柏清

1991.12

目 录

第一章 开关电容网络的基本原理	(1)
第一节 系统分类.....	(1)
第二节 抽样数据系统与 Z 变换.....	(3)
第三节 频率变换.....	(17)
第四节 开关电容电路基本元件.....	(23)
习 题.....	(31)
第二章 开关电容网络的分析方法	(34)
第一节 等效电路法.....	(34)
第二节 状态变量分析法.....	(56)
第三节 修正节点法.....	(71)
第四节 双图修正节点法.....	(89)
第五节 灵敏度.....	(98)
习题.....	(106)
第三章 有源开关电容双二阶滤波电路	(112)
第一节 寄生不灵敏开关电容积分器.....	(113)
第二节 单功能开关电容双二阶电路.....	(117)
第三节 双二阶电路的系统设计.....	(125)
第四节 高阶开关电容滤波器的级联实现.....	(144)
第五节 运算放大器的有限增益和带宽对开关电容滤波器特性的影响.....	(152)
第六节 开关电容网络的噪声分析.....	(157)
习 题.....	(160)
第四章 无源梯形的有源开关电容模拟	(164)
第一节 连续积分器.....	(165)

第二节	离散积分器·····	(167)
第三节	LDI变换开关电容跳耦滤波器·····	(173)
第四节	采用预补偿设计法(<i>a</i>)的双线性开关电容跳耦滤波器·····	(185)
第五节	采用预补偿设计法(<i>b</i>)的双线性开关电容跳耦滤波器·····	(196)
第六节	元件阻抗模拟开关电容梯形滤波器·····	(204)
习 题	·····	(222)
第五章	开关电容网络的应用·····	(225)
第一节	开关电容电压放大器·····	(225)
第二节	开关电容振荡器·····	(228)
第三节	开关电容幅度调制解调器·····	(235)
第四节	可编程开关电容滤波器·····	(240)
第五节	开关电容数—模和模—数变换器·····	(247)
第六节	开关电容均衡器·····	(252)
第七节	开关电容多通道滤波器·····	(259)
参考文献	·····	(265)

第一章 开关电容网络的基本原理

第一节 系统分类

图 1-1 所示的方框代表一个系统。该系统可以是线性的或非线性的，也可以是处理连续时间（模拟）信号的连续时间系统或处理离散时间信号的离散时间系统。处理数字信号的数字系统属于离散时间系统，它的输入输出信号只在离散瞬时改变，在两个瞬时之间的信号值没有意义。抽样数据系统处理的抽样数据信号也只在离散瞬时改变，因此可以采用离散系统的分析方法。但和数字信号不同，它在两个抽样瞬时之间一般保持定值。因此抽样数据系统实质上属于连续时间系统。在这样的系统中，我们把抽样数据输入和输出信号表示为离散变量 nT 的函数，

即 $x = x(nT)$ $y = y(nT)$

或简写为

$$x = x(n) \quad y = y(n)$$

其中 n 为整数， T 为两个抽样瞬时之间的时间间隔。

图 1-2 表示这三种系统的输入输出信号形式。连续系统与离

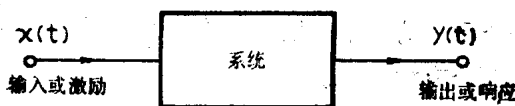
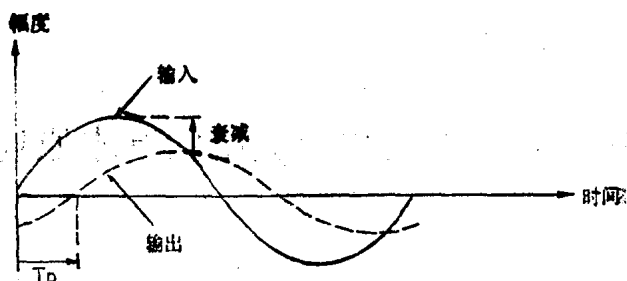
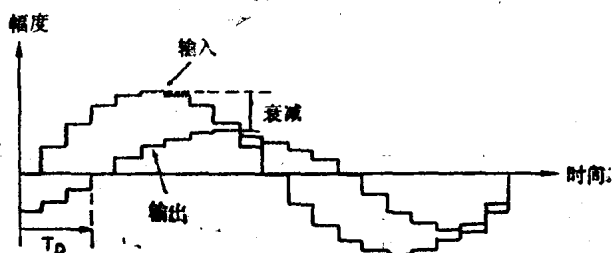


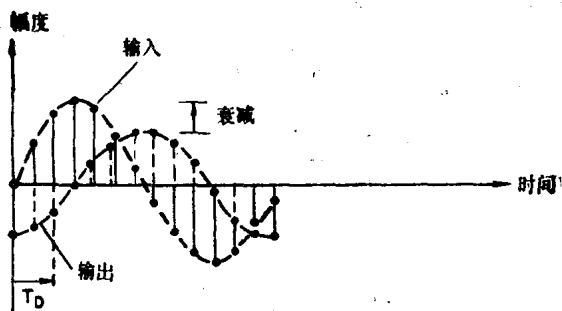
图 1-1 系统的图示



(a) 连续时间系统，例如有源RC滤波器



(b) 抽样数据系统，例如开关电容滤波器



(c) 数字系统，例如数字滤波器

图 1-2 连续时间、抽样数据和数字系统的信号形式

散系统之间一个重要的数学差别是，连续系统用微分方程表征，而离散系统则由差分方程表征。

一个系统可以是时不变的。线性时不变系统的定义为

$$x(t+T) \rightarrow y(t+T) \quad T > 0$$

离散时不变系统定义如下:

若 $x(nT) \rightarrow y(nT)$

则 $x((n-k)T) \rightarrow y((n-k)T)$

因果系统在激励之前不能有响应,即如果激励在 t_0 或 mT 时加上,则 $t < t_0$ 或 $k < m$ 时的响应为零。

本书讨论的开关电容网络,属于抽样数据系统,且一般是时变系统,但经过一些数学处理后,仍可按时不变系统对待。

第二节 抽样数据系统与Z变换

连续信号在离散瞬时 nT ($n = 0, 1, 2 \dots$) 下抽样就得到抽样信号 $x(nT)$, T 为抽样周期。在数字系统中,抽样后还要经过量化,因此数字滤波器的输入输出用数字信号表征。开关电容滤波器(SCF)则直接在抽样信号下工作,不需经过A/D, D/A变换。毫无疑问,就处理连续信号来说,这是它比数字滤波器优越之处。

图1-3表示连续输入/连续输出抽样数据系统。有许多开关电容滤波器本身就具有抽样/保持(S/H)功能,它包括虚线框内的所有部分。

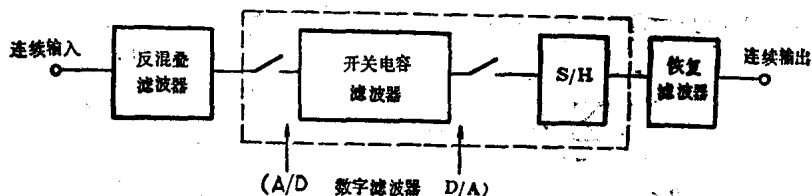


图 1-3 抽样数据系统

一、抽样过程

如图1-4(a)所示, 抽样过程可视为一调制过程, 即抽样信号 $\hat{x}(t)$ 作为连续信号 $x(t)$ 与抽样脉冲 $s(t)$ 的乘积。

1. 理想抽样

首先考虑理想抽样。抽样脉冲如图1-4(b)所示, 设冲激响应 $S_s(t)$

$$S_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT)$$

则冲激抽样信号 $\hat{x}(t)$ 为

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= x(t)S_s(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t-nT) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(t-nT) \end{aligned} \quad (1-1)$$

根据傅氏变换的频率卷积特性, 可得抽样信号的频谱为

$$\begin{aligned} \hat{X}(\Omega) &= F(\hat{x}(t)) = \frac{1}{2\pi} \left[X(\Omega) \cdot \Omega_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\Omega - n\Omega_s) \right] \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(\Omega - n\Omega_s) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 $\Omega_s = \frac{2\pi}{T}$ 为抽样角频率。图1-5(a)所示的为抽样信号在 $\Omega_s > 2\Omega_m$ 时的频谱, Ω_m 是基带的最高频率, 它是连续信号频谱 $X(\Omega)$ 的周期重复, 周期为 Ω_s , 幅度为 $X(\Omega)$ 的 $\frac{1}{T}$ 倍。若 $\Omega_s < 2\Omega_m$, 则将导致频谱混叠, 如图1-5(b)所示。因此 $\Omega_s \geq 2\Omega_m$ 是频谱无混叠的抽样条

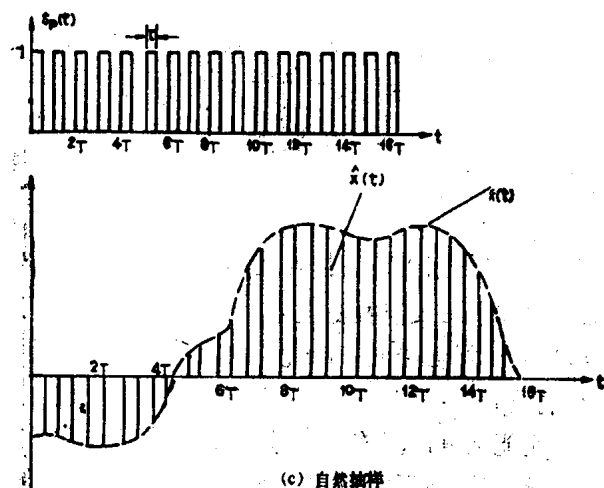
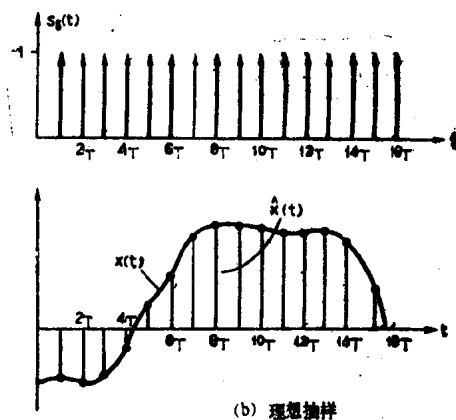
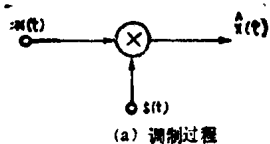


图 1-4 抽样过程

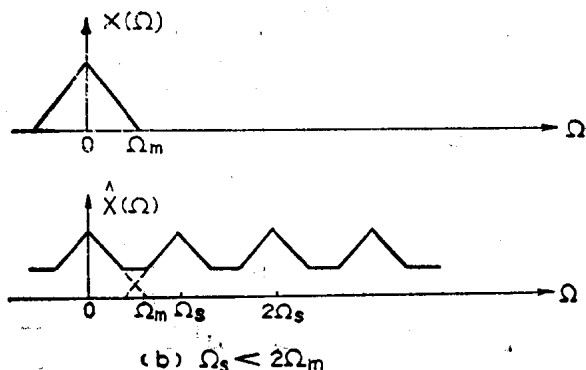
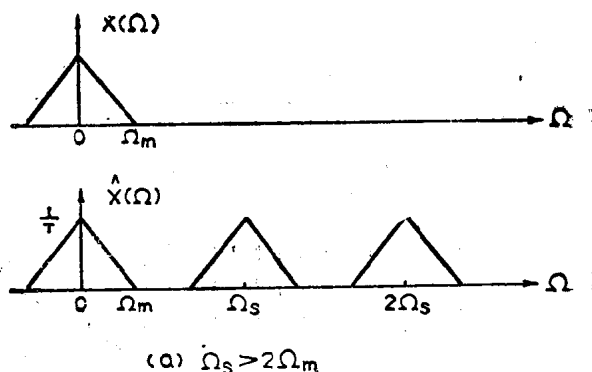


图 1-5 抽样信号频谱

件，这就是著名的奈奎斯特抽样定理。抽样频率的一半 $\frac{\Omega_s}{2}$ 称为折叠频率。图1-3中的反混叠滤波器，就是为了阻止高于折叠频率的杂散频谱进入抽样器造成频谱混叠而设置的。

没有混叠的抽样信号通过截止频率为 Ω_m 的低通滤波器（见图1-6），便能恢复出原连续信号。由图可见， Ω_s 离 Ω_m 愈远，过渡带愈宽，对恢复滤波器的要求也就愈低。

2. 自然抽样

自然抽样脉冲 $S_s(t)$ 如图1-4(c)所示，它是宽度为 τ 的矩形

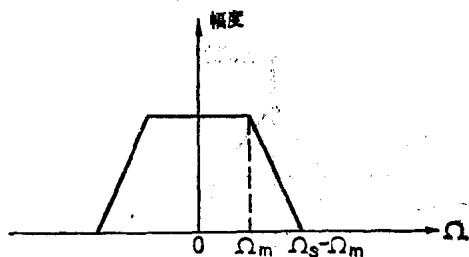


图 1-6 恢复滤波器

脉冲串，其数学表示式为

$$S_r(t) = \begin{cases} 1 & nT - \frac{\tau}{2} \leq t \leq nT + \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

由 $x(t)$ 调制 $S_r(t)$ 所得的抽样信号 $\hat{x}(t)$ ，其幅度跟踪 $x(t)$ 。通常称这种调制为脉冲幅度调制(PAM)。和前面的分析类似，根据频率卷积定理可求出这种抽样信号的频谱为

$$\hat{X}(\Omega) = \frac{\tau}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\Omega_s \tau}{2}}{\frac{n\Omega_s \tau}{2}} X(\Omega - n\Omega_s) \quad (1-3)$$

频谱如图1-7所示。与理想抽样信号频谱相比，包络 $\frac{\sin \frac{n\Omega_s \tau}{2}}{\frac{n\Omega_s \tau}{2}}$ 加

到等幅度之上。若 T 比 τ 大很多，则包络的影响很小，接近理想抽样。

3. 瞬时抽样

瞬时抽样脉冲 $S_i(t)$ 如图 1-8 所示。瞬时抽样信号是一串平顶脉冲，平顶脉冲的幅度由抽样脉冲前沿或后沿时刻的连续信号幅度决定。图 1-8 所示的抽样信号脉冲幅度对应前沿时刻的连续信号

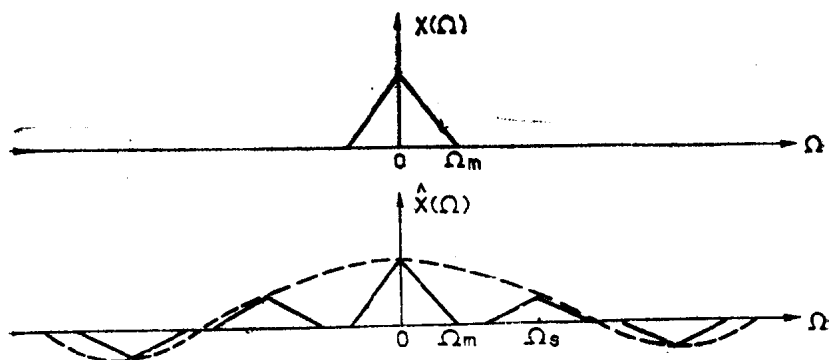


图 1-7 自然抽样频谱

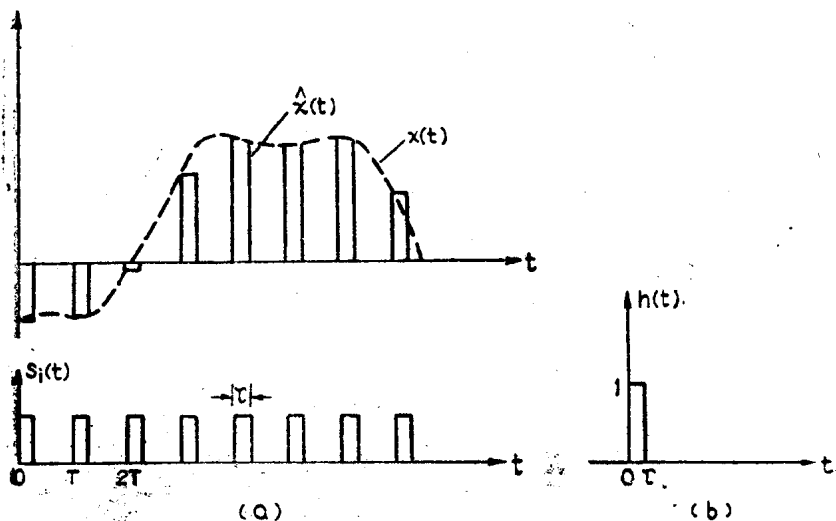


图 1-8 瞬时抽样过程

幅度，这种抽样信号可认为是先经理想抽样，然后通过一个冲激响应为

$$h(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

的保持电路所获得的信号。冲激响应如图 1-8 (b) 所示。由于保持电路的频率响应为

$$H(\Omega) = \tau \cdot \frac{\sin \frac{\Omega \tau}{2}}{\frac{\Omega \tau}{2}} e^{-j\Omega \frac{\tau}{2}}$$

故瞬时抽样信号的频谱为

$$\hat{X}'(\Omega) = \hat{X}(\Omega) \cdot H(\Omega) = \frac{2 \sin \frac{\Omega T}{2} e^{-j\frac{\Omega \tau}{2}}}{\Omega T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(\Omega - n\Omega_s) \quad (1-4)$$

若频谱不发生混叠, 也可用一个截频为 Ω_s 的低通滤波器把连续信号从抽样信号中取出来。

若 $\tau = T$ (T 为抽样周期), 则瞬时抽样信号变成全保持信号。它属于阶梯信号。后面要讨论的开关电容网络常常在这种信号下工作。

二、Z 变换

拉普拉斯变换是分析连续时间系统的重要工具, 它把连续时域函数变换成 S 域函数。类似地, Z 变换把离散时域函数变换成 Z 域函数, 是在 Z 域中分析离散时间系统的一种重要方法。采用 Z 变换分析开关电容网络, 导出 Z 域等效电路, 就可把分析连续有源 RC 网络的电路理论工具推广到开关电容网络。这种变换不但便于分析设计, 更为重要的是能帮助读者进一步了解开关电容网络的本质。

现考虑冲激抽样信号

$$\hat{x}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \delta(t - nT)$$

对上式取拉氏变换, 得

$$\hat{X}(s) = L[\hat{x}(t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)e^{-s nT} \quad (1-5)$$

在(1-5)式中作下列替换

$$z = e^{sT} \quad (1-6)$$

就得到

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (1-7)$$

上式就是序列 $x(n)$ 的Z变换, Z为复变量。它代表Z变换和拉氏变换的关系, 称为标准Z变换。在正弦稳态情况下, $s = j\Omega$, $z = e^{j\Omega T}$ 。

现进一步分析标准Z变换。令 $s = \sigma + j\Omega$, $z = |z| e^{j\omega T}$, 由(1-6)式得

$$z = e^{\sigma T} \cdot e^{j\Omega T}$$

由于 $|z| = e^{\sigma T}$, 显然有

$$|z| \begin{cases} < 1 & \sigma < 0 \\ = 1 & \sigma = 0 \\ > 1 & \sigma > 0 \end{cases}$$

因此, S域的 $j\Omega$ 轴映射为Z域单位圆, S平面左半平面映射到单位圆内, 右半平面映射到单位圆外, S平面原点对应 $Z=1$ 。当 Ω 在 $\pm \frac{\Omega_s}{2}$ 之间变化时, ωT 在 $\pm \pi$ 之间变化。每增加一个抽样频率 Ω_s , ωT 相应增加 2π , 也即重复旋转一周, Z平面重叠一次。这表明标准Z变换所确定的S域与Z域之间的关系是一种多值映射关系。

(1-7)式是双边Z变换。单边Z变换定义为

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (1-8)$$

可视为双边Z变换的特殊情况, 即因果序列的双边Z变换。因为信号经常被假定为因果序列, 所以单边Z变换用得较多。

一个线性时不变抽样数据系统可用下列差分方程表示:

$$y(nT) + \sum_{i=1}^M b_i y[(n-i)T] = \sum_{i=0}^N a_i x[(n-i)T] \quad (1-9)$$

式中序列 $y[(n-i)T]$ 为输出, $x[(n-i)T]$ 为输入, M 和 N 为有限非负正数。若所有的 $b_i = 0$, 则系统为非递归的, 也称为 $N+1$ 个抽头横向滤波器, 或有限冲激响应滤波器(FIR)。若 $M \geq 1$, $b_i \neq 0$, 则系统称为 M 阶递归系统或无限冲激响应滤波器(IIR)。

对(1-9)式取 Z 变换, 由于 Z 变换的移位特性 $Z\{x(n-i)\} = z^{-i}X(z)$, 所以, 可得系统的传递函数

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^N a_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^M b_i z^{-i}} \quad (1-10)$$

$H(z)$ 的反变换为单位脉冲响应 $h(n)$ 。传递函数在开关电容网络的分析和设计中起着十分重要的作用。下面举几个求离散时间系统 $H(z)$ 的例子。

例1-1 一阶离散系统的差分方程为

$$y(n) = x(n) + by(n-1)$$

对上式取 Z 变换,

$$\text{得} \quad H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - bz^{-1}}$$

由差分方程容易得出图1-9的结构流图, 其中 z^{-1} 为延时单元。

例1-2 二阶离散系统的差分方程为

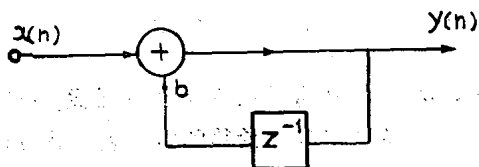


图 1-9 一阶离散系统结构流图