高等学校教学用书

信号变换技术

（二次变换部分）

程镛基　马筠虹　编著

高等学校教学用书

信号变换技术

（二次变换部分）

程肇基　马筠虹　编著

浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内 容 提 要

信号变换技术由两大部分组成：一次变换部分和二次变换部分。本书系二次变换部分，内容包括采样和量化、模拟开关、数据放大、采样保持、模数转换和数模转换等内容，分别叙述其基本理论、基本电路、部件和装置。

本书可供高等工业院校应用电子技术专业本科生作教材，也可供其他有关专业的师生以及从事智能化数字仪表、计算机应用和自动控制的工程技术人员运用。

信 号 变 换 技 术

（二次变换部分）

程学[illegible]、马[illegible]红 编

责任编辑 龚达[illegible]

浙江大学出版社出版
[illegible]山东[illegible]印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

※ ※ ※

开本 850×1168 1／32 7.5印张 188千字
1988年6月第一版 1992年9月第二次印刷
印数：5001—8000
ISBN 7-308-000[illegible]-9
TN·009 定价：3.00元

前　言

本书按照高等工业院校“应用电子技术”专业本科生的“信号变换技术”课程教学大纲编写。该课是在电路原理、模拟电子电路、数字电子电路等课程的基础上开设的。分为两大部分：一次变换部分重点在非电量到电量的变换，二次变换部分重点在模拟量与数字量之间的变换。

电子数字计算机在控制、信号检测和处理中得到广泛应用，其对象都是数字量信号；但在生产和科学研究中所遇到的物理量大多是模拟量信号，包括电压信号、其他电信号和非电量信号，这些信号必须进行变换才能送到电子数字计算机，因此有非电量-电量，模拟量-数字量的变换问题。计算机处理后的结果也往往要从数字量变换成合适的模拟量信号，才能控制执行机构。开设本课程的目的就在这里。

本书分析信号变换的基本理论、部件、电路和装置，并举实例结合讲述；附有习题及参考答案，以供教学中参考。

书稿承上海工业大学电机系戈以荣教授审阅；编写大纲经教材编审小组讨论及中国纺织大学洪钟威教授审阅，提出了许多宝贵意见；许祖安老师还对书稿提出了许多宝贵意见。本书编写中得到各级领导及教研室同志们支持，并参考各兄弟单位和个人撰写的著作和文献，在此谨致衷心的感谢。由于作者水平所限，不当之处恳请读者批评指正。

编著者

1987年于杭州

书中使用符号说明

符号	意义
A	输入或输出的模拟量信号；放大器
A/D	模拟量-数字量
A/DC，ADC	模数转换[器]
b	[晶体管的]基极
B	磁通[量]密度
BJ	电压比较器
c	[晶体管的]集电极
C	电容[器]通用符号
$CMRR$	共模抑制比
CP	时钟脉冲
CPU	中央处理器
D	输入或输出的数字量信号；二极管通用符号；[场效应管的]漏极
D/A	数字量-模拟量
D/AC，DAC	数模转换[器]
e	[晶体管的]发射极；感应电动势通用符号
E	直流电源电压，基准电源
f	频率通用符号
f_m	最高[信号]频率
f_s	采样频率
G	电导通用符号；[场效应管的]栅极
GND	模拟(数字)地，零参考电压端
H	保持

i	时变电流通用符号
I	直流电流通用符号，恒流源电流
$\bar{I}$	平均电流
I_{sr}, i_{sr}	输入电流
I_{sc}, i_{sc}	输出电流
I/O	输入/输出
K	开关；放大器的放大系数；常数通用符号
L	电感[器]的通用符号
LSB	[二进制数的]最低位
LSB	最小量化单位
MSB	[二进制数的]最高位
$NMRR$	常态抑制比
R	电阻的通用符号
R_L	负载电阻
R_{on}	开关导通电阻
R_{off}	开关断开电阻
r_c	晶体管集电极体电阻
r_e	晶体管发射极体电阻
S	[场效应管的]源极
S	采样
S/H	采样-保持[信号]
t	时间
T	时间间隔，周期，时间常数；晶体管的通用符号
U	直流电压通用符号
u	时变电压通用符号
U_{be}, u_{be}	[晶体管的]基射极间的电压
u_{ce}	[晶体管的]集射极间的电压
U_{ces}	[晶体管的]集射极间饱和电压

U_d	驱动电压
U_F, u_F	反馈电压
U_{ref}	基准电压，参考电压
U_{sr}, u_{sr}	输入电压
U_{sc}, u_{sc}	输出电压
$\bar{U}$	平均电压
ΔU	两电压之差，误差电压，运算放大器失调电压
W	电位器的通用符号
YF	与非门[电路]
Z	阻抗的通用符号
α	[晶体管的]共基极电流放大系数
β	[晶体管的]共射极电流放大系数
ε	误差量的通用符号
$\bar{\varepsilon}$	均方误差
η	效率
θ, ϕ	相角[差]
τ	时间间隔，周期，时间常数
Φ, ϕ	磁通[量]
ω	角频率

目　录

第一章　采样和量化过程

第一节　采样过程

现代电子计算机基本上是数字式的，数字式电子计算机不能直接处理连续的模拟量信号，只能处理离散（断续）的数字量信号。实际生产中许多物理量，如电压、电流、温度、位移等，在时间上（时域）和幅度上都是连续的模拟量信号，必须将这些模拟量信号变换成时域和幅度都是离散的数字量信号。这就需要采样、量化和模数转换。

首先遇到的是采样问题，用采样开关来完成。其中，输入信号是时间的连续函数 $f(t)$，输出信号则在时间上为一个离散量的 $f_s(t)$，如图 1-1。因此，只有在很短的采样时间内才能获得信号，其余大部分时间没有得到信号。这就产生一个问题，怎样才能使输出信号$f_s(t)$完全能代表输入信号$f(t)$？即怎样才能不丢信息？

我们先研究采样过程，在理论上证明能够得到全部信息的条件，以指导实践。证明时要用到一些数学工具，下面先叙述必要的数学工具。

第二节　数学工具

一、脉冲函数

脉冲函数$\delta(t)$是一个广义函数，又称狄拉克(Dirac)函数，是一个重要的数学工具，其定义为

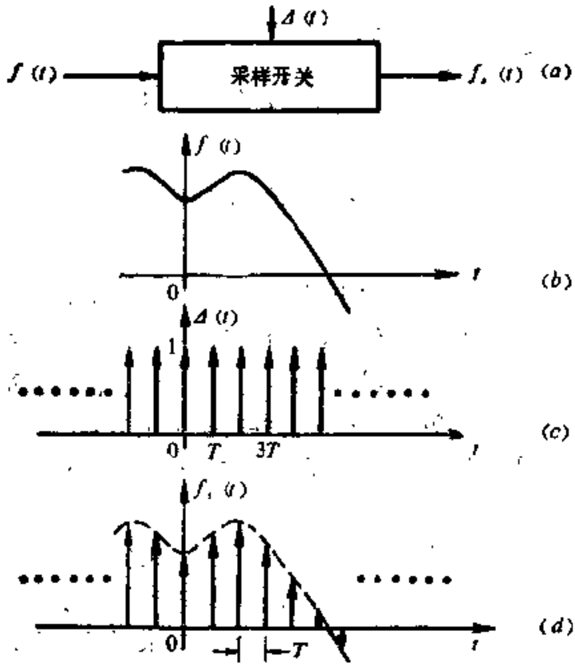

图1-1 采 样

$$\delta(t-t_0)=0 \qquad\qquad 当t\neq t_0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t-t_0)dt=1 \tag{1-1}$$

即脉冲函数只在$t=t_0$时出现，当出现时其值为无穷大，在其他时间都是零，而它下面的面积为1，它可以想象为一个振幅非常大、持续时间无限小而包含面积为1的脉冲波形。

脉冲函数的主要特性如下：

1． 赋值性

$$\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\delta(t)dt=f(0)$$

2． 筛选性

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-t_0)dt = f(t_0)$$

3． 乘积

$$f(t)\delta(t-t_0) = f(t_0)\delta(t-t_0)$$

脉冲函数的波形图很难象正规的函数一样用图形表示，往往画成如图1-2。

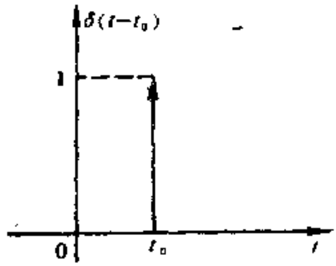

图1-2 脉冲函数

采样波 $\Delta(t)$ 可以看成一个等间隔的脉冲函数序列，由一连串单位脉冲波组成，如图1-3。

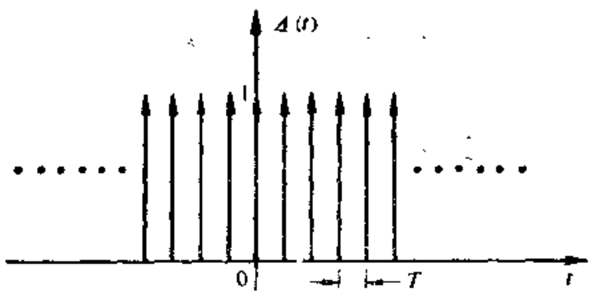

图1-3 采样波

$$\Delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-nT) \tag{1-2}$$

式中n为整数。下面分析采样理论时将用到。

二、傅里叶变换

在数学中我们已学过，一个周期函数可以用傅里叶级数展开，它的指数形式如下：

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_0 t} \tag{1-3}$$

式中 $\dot{C}_n=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-jn\omega_s t}dt$

$\omega_s=2\pi f_s=2\pi/T$

我们分析采样波$\Delta(t)$的傅里叶级数展开：

$$\dot{C}_n=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} \Delta(t)e^{-jn\omega_s t}dt$$

因为$\Delta(t)$在$-T/2$到$T/2$的一周内只有$\delta(t)$存在于原点处，其面积为 1，所以

$$\dot{C}_n=\frac{1}{T}\int_{0^-}^{0^+}\delta(t)e^{-jn\omega_s t}dt=1/T$$

与n无关，即采样波$\Delta(t)$的傅里叶级数各项系数都是$1/T$，代入式(1-3)得

$$\Delta(t)=\frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} \tag{1-4}$$

非周期函数可以用傅里叶积分表示，具有连续频谱

$$F(f)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j2\pi ft}dt \tag{1-5}$$

式中 $f(t)$——时间变量的函数 $F(f)$——频率变量的函数。t代表时间，f代表频率。

式(1-5)确定了$f(t)$的傅里叶变换$F(f)$。小写字母代表时间的函数，相应的大写字母代表这个时间函数的傅里叶变换，它是频率的函数。

数学上可以证明傅里叶逆变换为

$$f(t)=\int_{-\infty}^{\infty}F(f)e^{j2\pi ft}df \tag{1-6}$$

式(1-5)和式(1-6)是一一对应的，称为傅里叶变换对，这种

关系可记作

$$F(f)=\mathscr{F}[f(t)]$$

$$f(t)=\mathscr{F}^{-1}[F(f)]$$

或 $f(t)\Longleftrightarrow F(f)$

或 $f(t)\Longleftrightarrow F(f)$

通常，傅里叶变换是频率变量f的一个复函数

$$F(f)=R(f)+jI(f)=|F(f)|e^{j\theta(f)}$$

式中 $R(f)$——傅里叶变换的实部；

$I(f)$——傅里叶变换的虚部；

$|F(f)|$——$f(t)$的振幅谱或傅里叶谱；

$$|F(f)|=\sqrt{R^2(f)+I^2(f)};$$

$\theta(f)$——傅里叶变换的相角。

$$\theta(f)=\mathrm{tg}^{-1}[I(f)/R(f)]$$

傅里叶变换也可以用角频率ω来表示，则

正变换 $F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}dt$

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

数学上已经证明傅里叶变换有下列性质：

1. 线性特性

若 $f_1(t)\Longleftrightarrow F_1(f)$

$f_2(t)\Longleftrightarrow F_2(f)$

c_1，c_2为任意常数，则

$$c_1 f_1(t)+c_2 f_2(t) \Longleftrightarrow c_1 F_1(f)+c_2 F_2(f)$$

2． 时间位移特性

若 $f(t) \Longleftrightarrow F(f)$

则 $f(t-t_0) \Longleftrightarrow F(f)e^{-j2\pi f t_0}$

3． 频率位移特性

若 $f(t) \Longleftrightarrow F(f)$

则 $f(t)e^{j2\pi t f_0} \Longleftrightarrow F(f-f_0)$

4． 对偶性

若 $F(f)=\mathscr{F}[f(t)]$

则 $\mathscr{F}[F(t)]=f(-f)$

特别是若$f(t)$是偶函数时

则 $\mathscr{F}[F(t)]=f(f)$

即时域与频域完全对偶。

下面我们举几个傅里叶变换的例子。

例 1：单位脉冲函数 $f(t)=\delta(t)$

$$F(f)=\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)e^{-j2\pi f t}dt=1$$

即单位脉冲函数的傅里叶变换为常数 1，与频率无关，如图 1-4 所示。

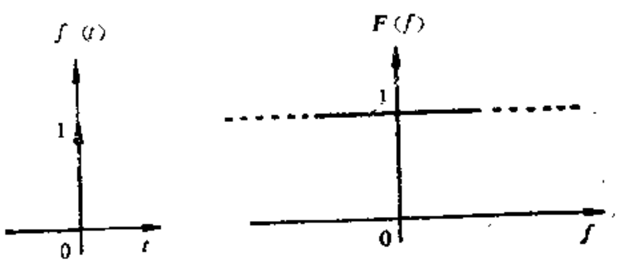

图1-4 脉冲函数的傅里叶变换对

例 2：求常数 1 的傅里叶变换

由对偶性可知，若$f(t)=1$，则$F(f)=\delta(f)$，即常数 1 的傅里叶变换为频域内的脉冲函数。

例 3：单个矩形脉冲信号，如图 1 - 5 。

$$f(t)=\begin{cases}A & \text{当} |t|<\tau/2 \\ 0 & \text{当} |t|>\tau/2\end{cases}$$

式中　A——脉冲幅度，

τ——脉冲宽度。

$$F(f)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j2\pi ft}dt=\int_{-\tau/2}^{\tau/2}Ae^{-j2\pi ft}dt$$

$$=A\tau\frac{\sin\pi f\tau}{\pi f\tau}$$

记$Sa(x)=\sin x/x$，称为单位采样函数，则 $F(f)$ 也是一种采样函数：

$$F(f)=A\tau Sa(\pi f\tau)$$

$F(f)$的图形见图 1 - 6 。

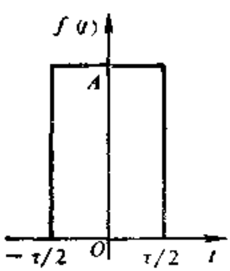

图1-5　矩形信号

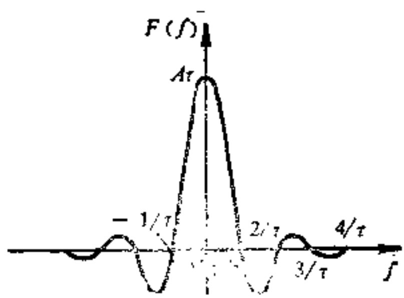

图1-6　采样函数

例 4：采样函数

由傅里叶变换的对偶性知，采样函数的傅里叶变换为频域内

的单个矩形脉冲。

例 5：余弦函数　　$f(t)=\cos\omega_0 t=\cos 2\pi f_0 t$

由例 2 知：$\mathscr{F}[1]=\delta(f)$

由频率位移特性得

$$\mathscr{F}[1\times e^{j2\pi f_0 t}]=\delta(f-f_0)$$

由欧拉公式

$$\cos\omega_0 t=\frac{1}{2}(e^{j2\pi f_0 t}+e^{-j2\pi f_0 t})$$

再由傅里叶变换的线性特性求得

$$\mathscr{F}[\cos 2\pi f_0 t]=\frac{1}{2}\{\mathscr{F}[e^{j2\pi f_0 t}+e^{-j2\pi f_0 t}]\}$$

$$=[\delta(f-f_0)+\delta(f+f_0)]/2$$

$$=\delta(f-f_0)/2+\delta(f+f_0)/2$$

可见，为两个单位脉冲函数的线性组合。

例 6：采样波

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

由式（1-4）

$$\Delta(t)=\frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty}e^{jn\omega_s t} \tag{1-7}$$

两边进行傅里叶变换

$$\mathscr{F}[\Delta(t)]=\mathscr{F}\left[\frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty}e^{jn\omega_s t}\right]$$

$$=\mathscr{F}\left[\frac{1}{T}\sum_{n=-\infty}^{\infty}e^{jn2\pi f_s t}\right]$$