信号与系统

第5章　连续时间系统的复频域分析

课程性质：必修

目录

CONTENTS

1.拉普拉斯变换及其性质

- 一、拉普拉斯变换(laplace transform)的定义（简称拉氏变换）

复数(plural) $s = \sigma + j\omega$

σ —使$f(t)$在区间[0,∞)内积分收敛而选定的常数(constant)

ω —角频率(angular frequency)，变量(variable)

s —称复频率(complex frequency)、广义频率(generalized frequency)

1.拉普拉斯变换及其性质

- 一、拉普拉斯变换的定义

正变换 $$F(s)=\int_0^{\infty} f(t)e^{-st}dt$$

反变换 $$f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(s)e^{st}ds$$

*f(t)*和*F(s)*是一对拉普拉斯变换对（Laplace pairs）。

1.拉普拉斯变换及其性质

- **二、拉普拉斯变换存在的条件**

（1）在t≥0的任一有限区间(finite interval)内，*f(t)*分段连续

（2）在t充分大时，*f(t)*满足不等式(inequality)

$$|f(t)| \leq Me^{ct}$$

其中M和c都是实常数(real constant)，即*f(t)*为指数级函数。

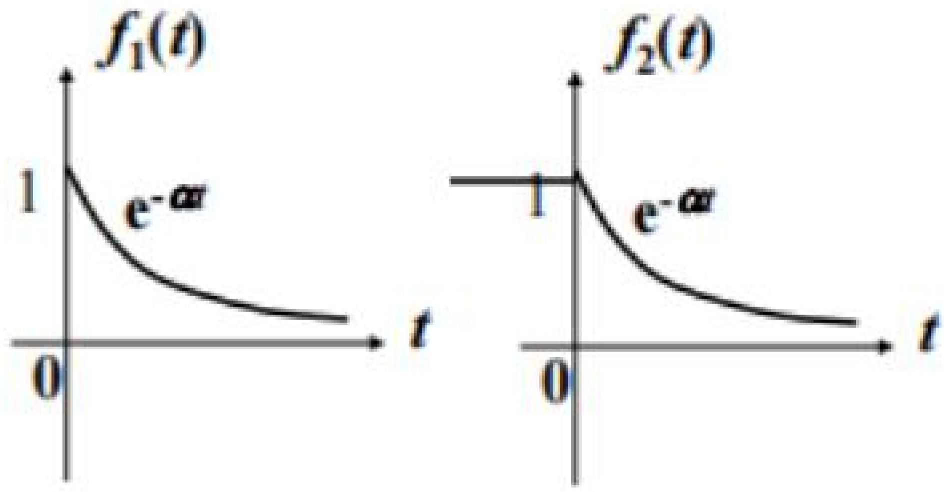
则 $F(s)=\int_{0_-}^{\infty} f(t)e^{-st}dt$ 在 $\sigma > c$ 的范围内存在。

1.拉普拉斯变换及其性质

- **三、拉普拉斯变换的唯一性(uniqueness)**

$f(t)$和$F(s)$一一对应

例 求图示两个函数的拉氏变换式 (Laplace transform)



解 由于定义的拉氏变换积分下限是0^-，两个函数的拉氏变换式相同

$$F(s)=\frac{1}{s+\alpha}$$

当取上式的反变换时，只能表示出t>0区间的函数式

$$\mathscr{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+\alpha}\right]=e^{-\alpha t} \qquad (t\geq 0)$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

- **拉普拉斯变换(laplace transform)的性质**

1、线性叠加性(linear superposition)

$$f_1(t) \leftrightarrow F_1(s) \qquad f_2(t) \leftrightarrow F_2(s)$$

那么 $$A_1 f_1(t) + A_2 f_2(t) \leftrightarrow A_1 F_1(s) + A_2 F_2(s)$$

若 $$f_1(t) \leftrightarrow F_1(jw) \qquad f_2(t) \leftrightarrow F_2(jw)$$

那么 $$A_1 f_1(t) + A_2 f_2(t) \leftrightarrow A_1 F_1(jw) + A_2 F_2(jw)$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

2、延时特性(delay characteristic)

若 $$f(t)\varepsilon(t) \leftrightarrow F(s)$$

则 $$f(t-t_0)\varepsilon(t-t_0) \leftrightarrow F(s)e^{-st_0}$$

若 $$f(t)\varepsilon(t) \leftrightarrow F(jw)$$

则 $$f(t-t_0)\varepsilon(t-t_0) \leftrightarrow F(jw)e^{-jwt_0}$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

3、复频域位移(complex frequency domain displacement)

若 $f(t) \leftrightarrow F(s)$

那么 $f(t)e^{-at} \leftrightarrow F(s+a)$

若 $f(t) \leftrightarrow F(j\omega)$，**且** ω_0 **为实常数，则**

$$\left.\begin{array}{l} f(t)e^{j\omega_0 t} \leftrightarrow F[j(\omega-\omega_0)] \\ f(t)e^{-j\omega_0 t} \leftrightarrow F[j(\omega+\omega_0)] \end{array}\right\}$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

四、尺度变换(scale transformation)

若$L[f(t)]=F(s)$，则

$$L[f(at)]=\frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)\quad(a>0)$$

若 $f(t)\leftrightarrow F(j\omega)$，$a$为非零实常数，则

$$f(at)\leftrightarrow\frac{1}{|a|}F(j\frac{\omega}{a})$$

时移和尺度变换都有时：

若$L[f(at-b)u(at-b)]=\frac{1}{a}F\left(\frac{s}{a}\right)e^{-s\frac{b}{a}}\quad(a>0,b>0)$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

五、时域微分(time-domain differential)

若$L[f(t)]=F(s)$,则$L\left[\dfrac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}\right]=sF(s)-f(0_-)$

若 $f(t)\leftrightarrow F(j\omega)$，则 $f'(t)\leftrightarrow j\omega F(j\omega)$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

六、时域积分(time domain integration)

若 $f(t) \leftrightarrow F(s)$， 则

$$f^{(-1)}(t) = \int_{0_-}^{t} f(\tau)\mathrm{d}\tau \leftrightarrow \frac{F(s)}{s}$$

若 $f(t) \leftrightarrow F(j\omega)$， 则

$$\int_{-\infty}^{t} f(\tau)\mathrm{d}\tau \leftrightarrow \frac{F(\mathrm{j}\omega)}{\mathrm{j}\omega} + \pi F(0)\delta(\omega)$$

推广(extension)：

$$f^{(-n)}(t) \leftrightarrow \frac{F(s)}{s^n} + \sum_{m=1}^{n} \frac{1}{s^{n-m+1}} f^{(-m)}(0_-)$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

七、时域卷积(time-domain convolution)

若 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(s)$，

$f_2(t) \leftrightarrow F_2(s)$，

并且 $f_1(t)$、$f_2(t)$ 为因果信号，

则 $f_1(t) * f_2(t) \leftrightarrow F_1(s)F_2(s)$

若 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(j\omega)$，$f_2(t) \leftrightarrow F_2(j\omega)$，

则 $f_1(t) * f_2(t) \leftrightarrow F_1(j\omega) \cdot F_2(j\omega)$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

八、复频域(complex frequency domain)卷积(时域相乘)

若 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(s)$，

$f_2(t) \leftrightarrow F_2(s)$，

并且 $f_1(t)$、$f_2(t)$ 为因果信号，

则 $$f_1(t) \cdot f_2(t) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi j} F_1(s) * F_2(s)$$

若 $f_1(t) \leftrightarrow F_1(j\omega)$，$f_2(t) \leftrightarrow F_2(j\omega)$

则 $$f_1(\mathrm{t}) \cdot f_2(\mathrm{t}) \leftrightarrow \frac{1}{2\pi} F_1(\mathrm{j}\omega) * F_2(\mathrm{j}\omega)$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

九、初值定理(initial value theorem)

若$f(t)$及$\dfrac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}$可以进行拉氏变换，且 $f(t)\longleftrightarrow F(s)$,则

$$\lim_{t\to 0_+} f(t)=f(0_+)=\lim_{s\to\infty} sF(s)$$

十、终值定理(terminal value theorem)

设$f(t)$,$\dfrac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}$的拉氏变换存在，若 $L[f(t)]=F(s)$, 则

$$\lim_{t\to\infty} f(t)=\lim_{s\to 0} sF(s)$$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

十一、复频域微分(differential)（对s微分）

若 $f(t) \leftrightarrow F(s)$，则

$$t^n f(t) \leftrightarrow (-1)^n \frac{d^n F(s)}{d^n s}$$ n取正整数

十二、复频域积分(integral)（对s积分）

若 $f(t) \leftrightarrow F(s)$，则 $\dfrac{f(t)}{t} \leftrightarrow \displaystyle\int_s^{\infty} F(\lambda)\,d\lambda$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

1	线性定理	齐次性	$L[af(t)]=aF(s)$
		叠加性	$L[f_1(t)\pm f_2(t)]=F_1(s)\pm F_2(s)$
2	微分定理	一般形式	$L[\frac{df(t)}{dt}]=sF(s)-f(0)$ $L[\frac{d^2f(t)}{dt^2}]=s^2F(s)-sf(0)-f'(0)$ $\vdots$ $L[\frac{d^nf(t)}{dt^n}]=s^nF(s)-\sum_{k=1}^{n}s^{n-k}f^{(k-1)}(0)$ $f^{(k-1)}(t)=\frac{d^{k-1}f(t)}{dt^{k-1}}$
		初始条件为 0 时	$L[\frac{d^nf(t)}{dt^n}]=s^nF(s)$
3	积分定理	一般形式	$L[\int f(t)dt]=\frac{F(s)}{s}+\frac{[\int f(t)dt]_{t=0}}{s}$ $L[\iint f(t)(dt)^2]=\frac{F(s)}{s^2}+\frac{[\int f(t)dt]_{t=0}}{s^2}+\frac{[\iint f(t)(dt)^2]_{t=0}}{s}$ $\vdots$ $L[\overbrace{\int\cdots\int}^{共n个} f(t)(dt)^n]=\frac{F(s)}{s^n}+\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{s^{n-k+1}}[\overbrace{\int\cdots\int}^{共n个} f(t)(dt)^n]_{t=0}$
		初始条件为 0 时	$L[\overbrace{\int\cdots\int}^{共n个} f(t)(dt)^n]=\frac{F(s)}{s^n}$

1.拉普拉斯变换、性质及其收敛区

4	延迟定理（或称 t 域平移定理）	$L[f(t-T)1(t-T)]=e^{-Ts}F(s)$
5	衰减定理（或称 s 域平移定理）	$L[f(t)e^{-at}]=F(s+a)$
6	终值定理	$\lim\limits_{t\to\infty} f(t)=\lim\limits_{s\to 0} sF(s)$
7	初值定理	$\lim\limits_{t\to 0} f(t)=\lim\limits_{s\to\infty} sF(s)$
8	卷积定理	$L[\int_0^t f_1(t-\tau)f_2(\tau)d\tau]=L[\int_0^t f_1(t)f_2(t-\tau)d\tau]=F_1(s)F_2(s)$

2.常用拉普拉斯变换

- **基本信号(basic signal)的拉普拉斯变换(laplace transform)**

1、单位阶跃函数(unit step function) $\varepsilon(t)$

2、单边指数函数(unilateral exponential function) $e^{-at} \bullet \varepsilon(t)$

3、单位冲激函数(unit impulse function) $\delta(t)$

4、正弦函数(sine function) $\sin\omega_0 t \cdot \varepsilon(t)$

2.常用拉普拉斯变换

序号	拉氏变换 E(s)	时间函数 e(t)
1	1	δ (t)
2	$\frac{1}{1-e^{-Ts}}$	$\delta_T(t)=\sum_{n=0}^{\infty}\delta(t-nT)$
3	$\frac{1}{s}$	$1(t)$
4	$\frac{1}{s^2}$	t
5	$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$
6	$\frac{1}{s^{n+1}}$	$\frac{t^n}{n!}$
7	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}
8	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}
9	$\frac{a}{s(s+a)}$	$1-e^{-at}$
10	$\frac{b-a}{(s+a)(s+b)}$	$e^{-at}-e^{-bt}$
11	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\sin\omega t$
12	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\cos\omega t$
13	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at}\sin\omega t$
14	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-at}\cos\omega t$
15	$\frac{1}{s-(1/T)\ln a}$	$a^{t/T}$

3.拉普拉斯反变换(inverse transformation)

一、由象函数(image function)求原函数(primitive function)的三种方法

（1）部分分式法(partial fraction method)

（2）利用留数定理(residue theorem)—围线积分法(contour integral method)

（3）数值计算方法——利用计算机

3.拉普拉斯反变换(inverse transformation)

二、F(s)的一般形式

通常F(s)具有如下的有理分式(rational fraction)形式：

$$F(s)=\frac{A(s)}{B(s)}=\frac{a_m s^m+a_{m-1}s^{m-1}+\cdots+a_1 s+a_0}{b_n s^n+b_{n-1}s^{n-1}+\cdots+b_1 s+b_0}$$

a_i和b_i为实数(real number)，m，n为正整数(positive integer)。

当m<n，F(s)为有理真分式(rational proper fraction)

分解 $$F(s)=\frac{A(s)}{B(s)}=\frac{a_m(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{b_n(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}$$

3.拉普拉斯反变换(inverse transformation)

$$F(s)=\frac{A(s)}{B(s)}=\frac{a_m(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{b_n(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}$$

零点(zero point)　Z_1，Z_2，Z_3...Z_m是A(s)=0的根(root)，称为F(s)的零点

$$\left(\because A(s)=0\Rightarrow F(s)=0\right)$$

极点(pole)　p_1，p_2，p_3...p_n是B(s)=0的根，称为F(s)的极点

$$\left(\because B(s)=0\Rightarrow F(s)=\infty\right)$$

3.拉普拉斯反变换

三、拉氏逆变换(inverse Laplace transform)的过程

1.找出F(s)的极点(pole)

2.将F(s)展成部分分式(partial fraction)

3.求拉氏逆变换得f(t)

3.拉普拉斯反变换

四、部分分式展开法(m<n)

1.第一种情况：单实数(single real number)极点

$$F(s)=\frac{2s^2+3s+3}{s^3+6s^2+11s+6}$$

(1) 找极点 $F(s)=\dfrac{2s^2+3s+3}{(s+1)(s+2)(s+3)}$

(2) 展成部分分式 $F(s)=\dfrac{k_1}{s+1}+\dfrac{k_2}{s+2}+\dfrac{k_3}{s+3}$

求系数 $F(s)=\dfrac{1}{s+1}+\dfrac{-5}{s+2}+\dfrac{6}{s+3}$

(3) 逆变换 根据 $L\left[e^{-\alpha t}u(t)\right]=\dfrac{1}{s+\alpha}$

得：$f(t)=e^{-t}-5e^{-2t}+6e^{-3t}\quad(t\geq 0)$

3.拉普拉斯反变换

$$F(s)=\frac{N(s)}{D(s)}=\frac{N(s)}{(s-\lambda_1)(s-\lambda_2)\cdots(s-\lambda_n)}=\frac{k_1}{s-\lambda_1}+\frac{k_2}{s-\lambda_2}+\cdots+\frac{k_n}{s-\lambda_n}$$

其中 $k_j=(s-\lambda_j)F(s)\big|_{s=\lambda_j}$ 或 $k_j=\left.\dfrac{N(s)}{D'(s)}\right|_{s=\lambda_j}$

则上例 $F(s)=\dfrac{2s^2+3s+3}{(s+1)(s+2)(s+3)}=\dfrac{k_1}{s+1}+\dfrac{k_2}{s+2}+\dfrac{k_3}{s+3}$

$$k_1=(s+1)F(s)\big|_{s=-1}=(s+1)\left.\frac{2s^2+3s+3}{(s+1)(s+2)(s+3)}\right|_{s=-1}=1$$

同理：$k_2=(s+2)F(s)\big|_{s=-2}=-5$, $k_3=(s+3)\big|_{s=-3}=6$

$$\therefore F(s)=\frac{1}{s+1}+\frac{-5}{s+2}+\frac{6}{s+3}$$

3.拉普拉斯反变换

2.第二种情况：极点(pole)为共轭复数(conjugate complex)

$$F(s)=\frac{A(s)}{D(s)\left[(s+\alpha)^2+\beta^2\right]}=\frac{F_1(s)}{(s+\alpha-j\beta)(s+\alpha+j\beta)}$$

共轭极点出现在 $-\alpha\pm j\beta$

$$F(s)=\frac{K_1}{s+\alpha-j\beta}+\frac{K_2}{s+\alpha+j\beta}+\cdots\cdots$$

$$K_1=(s+\alpha-j\beta)F(s)\Big|_{s=-\alpha+j\beta}=\frac{F_1(-\alpha+j\beta)}{2j\beta}$$

$$K_2=(s+\alpha+j\beta)F(s)\Big|_{s=-\alpha-j\beta}=\frac{F_1(-\alpha-j\beta)}{-2j\beta}$$

可见K_1,K_2成共轭关系

假定 $K_1=A+jB$ 则 $K_2=A-jB=K^*_1$

3.拉普拉斯反变换

求 $f(t)$ $K_1=A+jB \quad K_2=A-jB=K_1^*$

如果将上式中共轭复数极点有关部分的逆变换用$f_c(t)$表示，则

$$f_C(t)=L^{-1}\left[\frac{K_1}{s+\alpha-j\beta}+\frac{K_2}{s+\alpha+j\beta}\right]=K_1e^{(-\alpha+j\beta)t}+K_1^*e^{(-\alpha-j\beta)t}$$

$$=e^{-\alpha t}\left(K_1e^{j\beta t}+K_1^*e^{-j\beta t}\right)$$

$$=e^{-\alpha t}[(A+jB)e^{j\beta t}+(A-jB)e^{-j\beta t}]$$

$$=2e^{-\alpha t}\left[A\cos(\beta t)-B\sin(\beta t)\right]$$

$$\frac{A+jB}{s+\alpha-j\beta}+\frac{A-jB}{s+\alpha+j\beta} \Leftrightarrow 2e^{-\alpha t}[A\cos(\beta t)-B\sin(\beta t)]$$

3.拉普拉斯反变换

3.第三种情况：有重根(double root)存在

$$F(s)=\frac{N(s)}{(s-\lambda_1)^m(s-\lambda_{m+1})\cdots(s-\lambda_n)}$$

$$=\frac{k_{11}}{(s-\lambda_1)^m}+\frac{k_{12}}{(s-\lambda_1)^{m-1}}+\cdots+\frac{k_{1m}}{s-\lambda_1}+\frac{k_{m+1}}{s-\lambda_{m+1}}+\cdots+\frac{k_n}{s-\lambda_n}$$

其中

$$k_{11}=(s-\lambda_1)^m F(s)\Big|_{s=\lambda_1}$$

$$k_{12}=\frac{d}{ds}[(s-\lambda_1)^m F(s)]\Big|_{s=\lambda_1}$$

$$k_{13}=\frac{1}{2}\frac{d^2}{ds^2}[(s-\lambda_1)^m F(s)]\Big|_{s=\lambda_1}$$

$$\vdots$$

$$k_{1m}=\frac{1}{(m-1)!}\frac{d^{m-1}}{ds^{m-1}}[(s-\lambda_1)^m F(s)]\Big|_{s=\lambda_1}$$

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

一、基本信号e^{st}激励下的零状态响应(zero state response)

$$f(t)=e^{st} \quad \Longleftrightarrow \quad y_f(t)=H(s)e^{st}$$

二、一般信号f(t)激励下的零状态响应

输入(input)

$$f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty}F(s)e^{st}ds$$

零状态响应

$$y_f(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty}[F(s)H(s)]e^{st}ds$$

$$=\frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty}Y(s)e^{st}ds$$

其中 $Y(s)=H(s)F(s)$ 　 $Y(s)$是$y_f(t)$的拉氏变换

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

即 $y_f(t) \Longleftrightarrow Y(s)=H(s)F(s)$

$$y_f(t)=L^{-1}[Y(s)]=L^{-1}[H(s)F(s)]$$

系统复频域分析过程如下：

$$f(t)\overset{L}{\leftrightarrow}F(s) \longrightarrow \boxed{H(s)} \longrightarrow Y(s)=H(s)F(s)$$

$$\downarrow L^{-1}$$

$$y_f(t)=L^{-1}[Y(s)]$$

注意：

上述求得的系统响应是零状态响应(zero state response)，零输入响应(zero input response)要按时域(time domain)方法求出。

系统传递函数(transfer function)的定义： $H(s)=\dfrac{Y(s)}{F(s)}$

Y(s)为零状态响应

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

例1：已知输入f(t)=10u(t)，系统传递函数为

$$H(s)=\frac{2s+3}{s^2+2s+5}$$

,初始条件为零，求系统响应。

解：因初始条件为零，系统只有零状态响应

$$F(s)=L[f(t)]=L[10u(t)]=\frac{10}{s} \qquad H(s)=\frac{2s+3}{s^2+2s+5}$$

$$Y(s)=H(s)F(s)=\frac{10(2s+3)}{s(s^2+2s+5)}=\frac{20s+30}{s[(s+1)^2+2^2]}$$

$$=\frac{6}{s}+\frac{-6s+8}{(s+1)^2+2^2}=\frac{6}{s}+\frac{-6(s+1)}{(s+1)^2+2^2}+\frac{14}{(s+1)^2+2^2}$$

$$y_f(t)=L^{-1}\left[Y(s)\right]=(6-6e^{-t}\cos 2t+7e^{-t}\sin 2t)u(t)$$

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

例2：已知输入 $f(t)=e^{-t}u(t)$ ，初始条件为 $y(0^-)=2$，

$y'(0^-)=1$，$H(s)=\dfrac{s+5}{s^2+5s+6}$ ，求系统响应。

解： 先求零输入响应

$H(s)$的极点为： $\lambda_1=-2$ $\lambda_2=-3$

零输入响应 $y_x(t)=c_1e^{-2t}+c_2e^{-3t}$

代入初始条件：

$$\left.\begin{aligned} y_x(0^-)&=y(0^-)=c_1+c_2=2 \\ y_x'(0^-)&=y'(0^-)=-2c_1-3c_2=1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} c_1&=7 \\ c_2&=-5 \end{aligned}$$

得： $y_x(t)=7e^{-2t}-5e^{-3t}$ $t\geq 0$

其次求零状态响应

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

其次求零状态响应(zero state response)

$$F(s)=L[f(t)]=L[e^{-t}u(t)]=\frac{1}{s+1}$$

$$Y(s)=H(s)F(s)=\frac{s+5}{(s+1)(s+2)(s+3)}=\frac{2}{s+1}+\frac{-3}{s+2}+\frac{1}{s+3}$$

$$\therefore\ y_f(t)=L^{-1}[Y(s)]=(2e^{-t}-3e^{-2t}+e^{-3t})u(t)$$

系统的全响应(full response)为：

$$\begin{aligned} y(t)&=y_f(t)+y_x(t)\\ &=(7e^{-2t}-5e^{-3t})+(2e^{-t}-3e^{-2t}+e^{-3t})\\ &=2e^{-t}+4e^{-2t}-4e^{-3t}\quad t\geq 0 \end{aligned}$$

4.线性系统拉普拉斯变换分析方法

三、单位冲激响应(unit impulse response)

当输入 $f(t)=\delta(t)$ 时，单位冲激响应为 $y(t)=h(t)$

$$F(s)=L[\delta(t)]=1$$

系统的零状态响应(zero state response)为：

$$y(t)=h(t)=L^{-1}[F(s)H(s)]=L^{-1}[H(s)]$$

所以 $$h(t)=L^{-1}[H(s)]$$

或 $$\boxed{h(t) \Longleftrightarrow H(s)}$$

单位冲激响应h(t)与传递函数H(s)是一对拉氏变换(laplace transform)

5.线性系统模拟

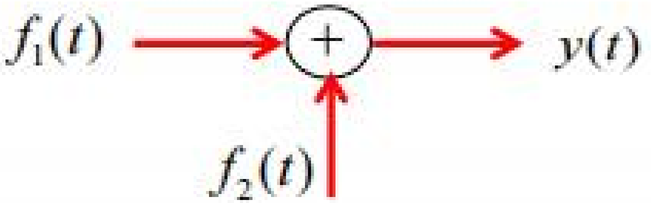
系统模拟(system simulation)：

对于线性系统模拟，是指在已知系统数学模型(mathematical model)的情况下，用一些基本单元（基本运算器(basic arithmetic unit)）组成该系统，称为系统的模拟。

5.线性系统模拟

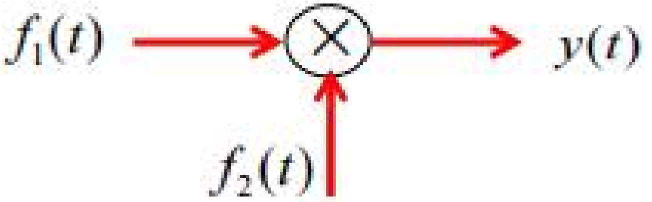
基本运算器(basic arithmetic unit)

加法器(adder)



$$y(t)=f_1(t)+f_2(t)$$

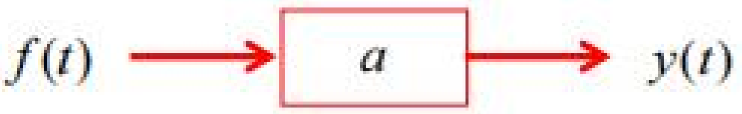
乘法器(multiplier)



$$y(t)=f_1(t)\bullet f_2(t)$$

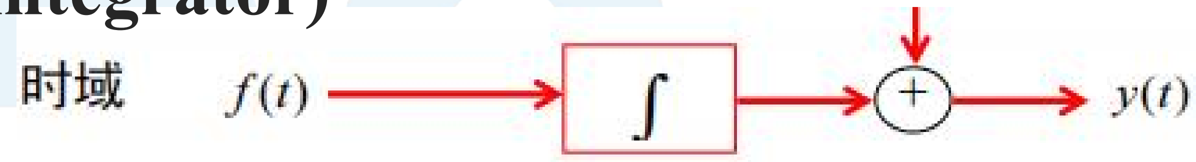
5.线性系统模拟

数乘器(digital multiplier)　（标量乘法器，比例器）

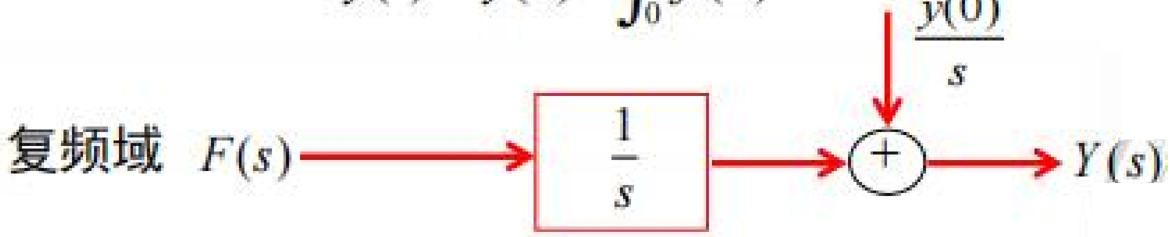


$$y(t)=af(t)$$

积分器(integrator)



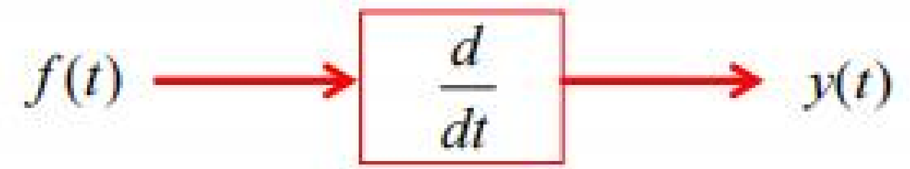
$$y(t)=y(0)+\int_0^t f(\tau)d\tau$$



$$Y(s)=\frac{y(0)}{s}+\frac{F(s)}{s}$$

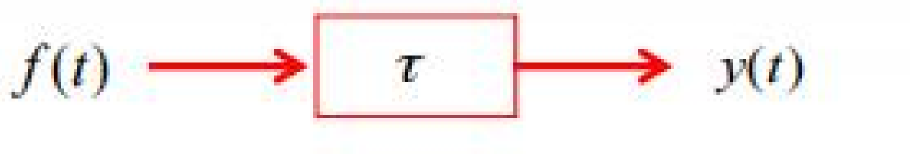
5.线性系统模拟

微分器(differentiator)

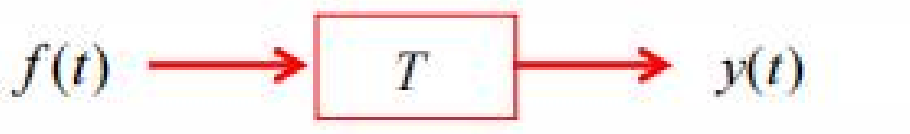


$$y(t)=\frac{df(t)}{dt}$$

延时器(delayer)



$$y(t)=f\left(t-\tau\right)$$



$$y(t)=f\left(t-T\right)$$

5.线性系统模拟

常用的模拟图有四种形式：

直接形式实现、并联(parallel connection)形式实现、串联(series connection)形式实现、混联(Hybrid linkage)形式实现

（1）从**微分方程(differential equation)**实现系统模拟(simulation)

（2）从**传递函数(transfer function)**实现系统模拟

（3）**梅森公式(Mason’s Formula)**实现系统模拟

谢谢聆听

Thanks for listening!