第13讲 用卷积积分求(任意阶电路)

在任意激励下动态电路的响应

纸笔计算器

1　单位冲激响应

$$h(t)=\frac{\mathrm{d}s(t)}{\mathrm{d}t}$$

$s(t)$：　$t\in(-\infty,+\infty)$

法3

单位冲激响应

分两个时间段：

$0^- \to 0^+$：确定初值 ⟶

列方程分析

0^-~0^+积分

法1

简便解法：

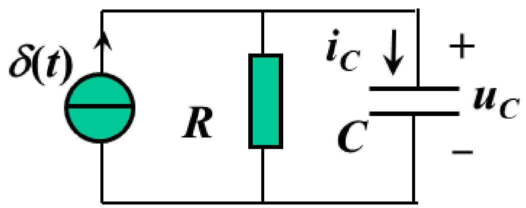
电容短路

电感开路

法2

$0^+ \to +\infty$：零输入响应

方法1　列写方程，把冲激源的作用表现在方程里
从$0^-\sim0^+$范围求积分



$u_C(0^-)=0$

1. t 在 $0^- \longrightarrow 0^+$间

$$C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+\frac{u_C}{R}=\delta(t)$$

u_C 不可能是冲激函数，否则KCL不成立

$$\int_{0^-}^{0^+} C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t+\underbrace{\int_{0^-}^{0^+}\frac{u_C}{R}\mathrm{d}t}_{=0}=\underbrace{\int_{0^-}^{0^+}\delta(t)\mathrm{d}t}_{=1}$$

法1步骤($0^-\sim0^+$部分)：
(1)列写$0^-\sim0^+$的方程
(2) $0^-\sim0^+$积分求$u_C(0^+)$
(3)微分关系求i_C

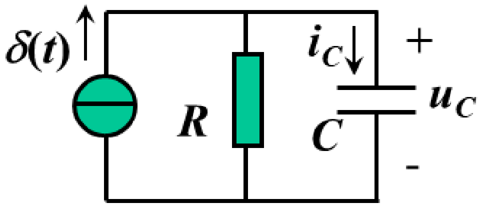
$$C[u_C(0^+)-u_C(0^-)]=1$$

注意：对高阶，不是太好分析

$$u_C(0^+)=\frac{1}{C}\neq u_C(0^-)$$

电容中的冲激电流使电容电压发生跳变

$$i_C=C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=\delta(t)$$



另一个思路（$0^-\sim0^+$ u_C是否有跳变）：

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) + \frac{1}{C}\int_{0^-}^{0^+} i_C(\tau)\mathrm{d}\tau$$

求$u_C(0^+)$的关键是：$0^-\sim0^+$中i_C有没有冲激

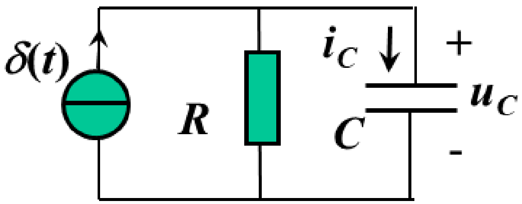
u_C如果有跳变
是由于冲激电流引起的

电路体系中不会有冲激电容电压

方法2　$\delta(t)$作用的那个瞬间，用替代定理，将C视作某个有限值电压源，然后用叠加定理的思想，看C上是否有冲激电流

$0^-\sim0^+$时有限值u_C产生有限值i_C，对$u_C(0^+)$无影响

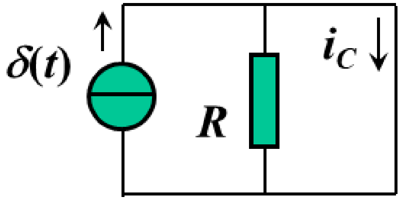
方法2　$\delta(t)$作用的那个瞬间，将C视作0值电压源（短路），看其上是否有冲激电流



法2：$\delta(t)$作用的那个瞬间，C视作0值电压源

$u_C(0^-)=0$

1. t 在 $0^- \longrightarrow 0^+$间



$i_C(0)=\delta(t)$

$$u_C(0^+)=u_C(0^-)+\frac{1}{C}\int_{0^-}^{0^+} i_C \mathrm{d}t = 0+\frac{1}{C}\int_{0^-}^{0^+}\delta(t)\mathrm{d}t=\frac{1}{C}$$

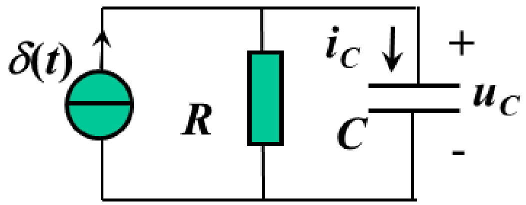
不等

$$u_C(0^-)=0$$

法2步骤：
(1) 画$\delta(t)$作用时电路(C短路)
(2) 求 i_C
(3) 积分关系求u_C

电容电压
发生跳变

外加冲激源引起的跳变



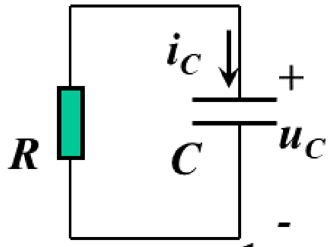
$u_C(0^-)=0$

t 在 $0^- \longrightarrow 0^+$ 间

不一定非得在$\delta(t)$作用的那个瞬间
C视作0值电压源

任意有限值电压源，求得的结果
都一样

2. $t>0^+$ 零输入响应 （RC放电）



$$u_C(0^+)=\frac{1}{C}$$

求响应$u_C(t)$、$i_C(t)$

$$u_C(t)=\frac{1}{C}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\qquad t\geq 0^+$$

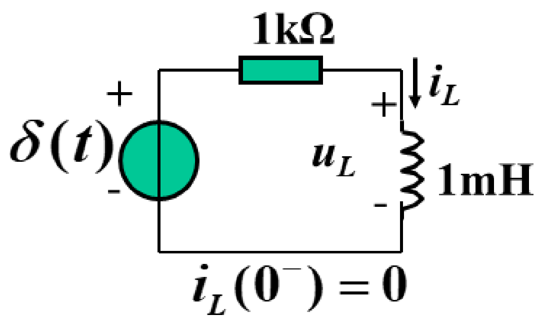
$$i_C(t)=-\frac{u_C}{R}=-\frac{1}{RC}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\qquad t\geq 0^+$$

$$\begin{cases} u_C(t)=\dfrac{1}{C}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\varepsilon(t) \\ i_C(t)=\delta(t)-\dfrac{1}{RC}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\varepsilon(t) \end{cases}$$

单选题 1分

$i_L(0^+)$=____A

注意单位



A 0

B 1

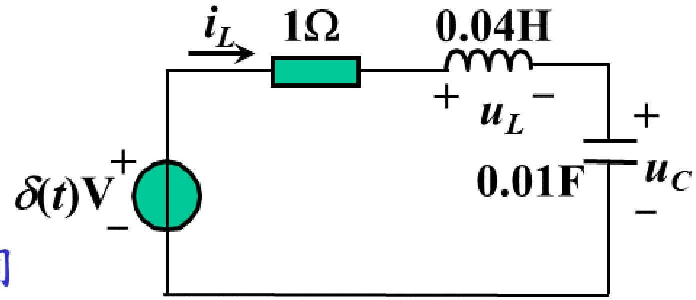
C 100

D 1000

8

例：二阶单位冲激响应

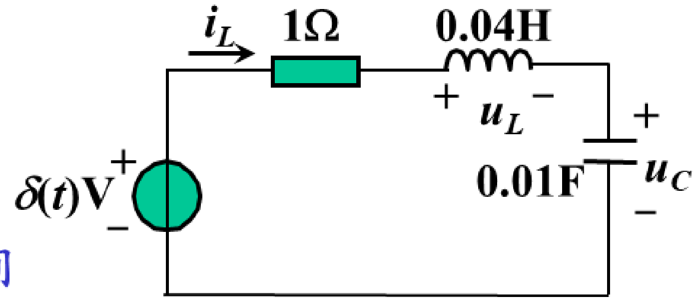
求图示电路中电压u_C。



法2第1步　t 在 0^- ⟶ 0^+间

例：二阶单位冲激响应

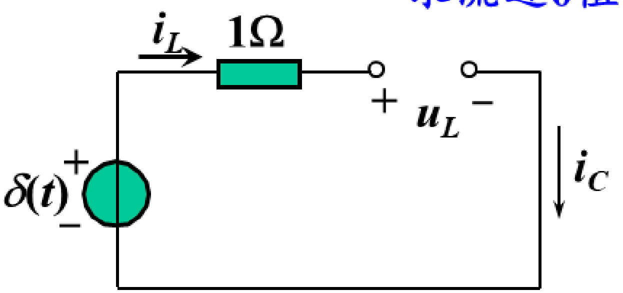
求图示电路中电压u_C。



法2第1步　t 在 $0^- \longrightarrow 0^+$间

在0^-~0^+期间C为0值电压源，L为0值电流源

求流过0值电压源电流和0值电流源上电压



$\boxed{i_C = 0}$　　$\boxed{u_L = \delta(t)\text{V}}$

$$u_C(0^+) = u_C(0^-) + \frac{1}{C}\int_{0^-}^{0^+} i_C \mathrm{d}t = 0$$

$$i_L(0^+) = i_L(0^-) + \frac{1}{L}\int_{0^-}^{0^+} u_L \mathrm{d}t = 25 \text{ A}$$

第2步　$t > 0^+$　求二阶电路的零输入响应(略)

单选题 1分

题图所示电路中，$i_L(0^+)=$ A

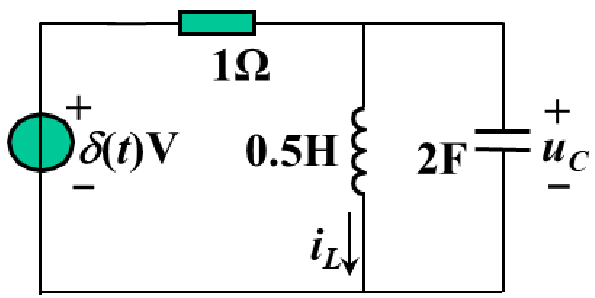
“红包”

A 0

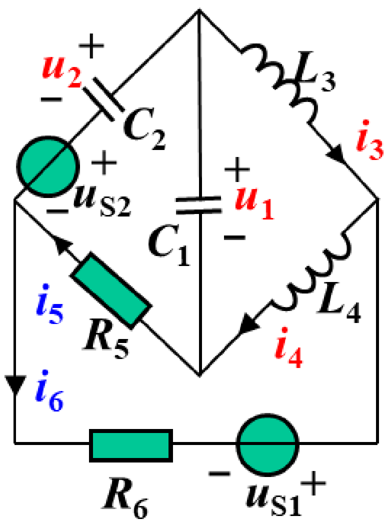
B 0.5

C 2

D ∞



至此，任意阶电路的单位冲激响应都可以求出



雨课堂 Rain Classroom

为什么要研究单位冲激响应？

- 求任意激励作用下动态电路零状态响应的需要。

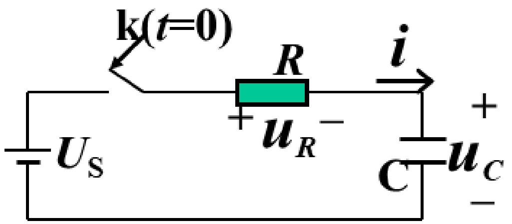
  ——卷积积分

- 获取系统自身性质的需要。
  - 自动控制原理、信号与系统、数字信号处理等课程

2 卷积积分概念的引入

复习

激励—响应线性关系



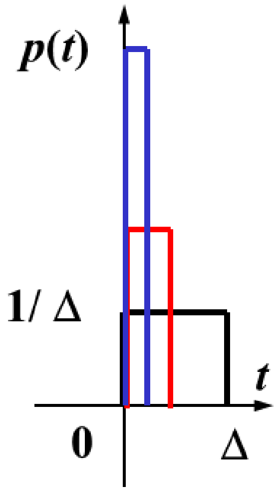
$u_C(0^-)=0$ 零状态

$$u_C = U_S(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t \ge 0$$

激励	响应
U_S	$u_C = U_S(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t \ge 0$
$2U_S$	$u_C = 2U_S(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t \ge 0$
$U_{S1}+U_{S2}$	$u_C = (U_{S1}+U_{S2})(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad t \ge 0$

利用这个性质求任意激励下电路的ZSR

复习一下表达式



单位脉冲函数　　　　　　　　　　单位脉冲响应

$$p(t)=\frac{1}{\Delta}\left[\varepsilon(t)-\varepsilon(t-\Delta)\right] \xrightarrow{\text{响应}} h_p(t)$$

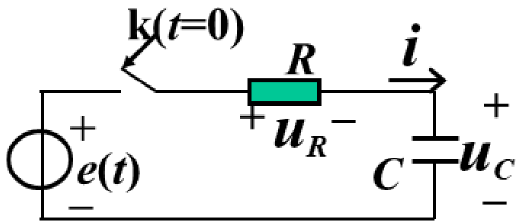
取极限 $\Delta\to 0$　$\frac{1}{\Delta}\to\infty$

$$\lim_{\Delta\to 0} p(t)=\delta(t) \xrightarrow[\text{响应}]{} h(t)$$

单位冲激函数　　　　　　　　　　单位冲激响应

$$\begin{array}{ccc} p(t) & \xrightarrow{\text{响应}} & h_p(t) \\ \downarrow & \text{取极限} & \downarrow \\ \delta(t) & \xrightarrow[\text{响应}]{} & h(t) \end{array}$$

求任意激励$e(t)$下电路的ZSR



$$\begin{tikzcd} p(t) \arrow[r, "响应"] \arrow[d] \arrow[dr, phantom, "取极限"] & h_p(t) \arrow[d] \\ \delta(t) \arrow[r, "响应"'] & h(t) \end{tikzcd}$$

基本观点：

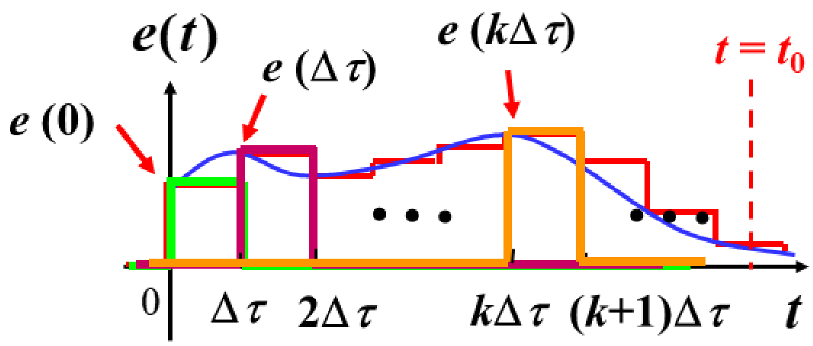
电路零状态，而且激励从0时刻施加，因此某一$t=t_0$时刻观察到的响应，应为$0\sim t_0$时间内所有激励产生的在t_0时刻响应之和（因为激励-响应是线性关系）

接下来，我们分别用叠加的思想来分别处理激励和响应，从而可以求任意t_0时刻的响应

处理激励

$0 < t < t_0$ 时段时间上分割

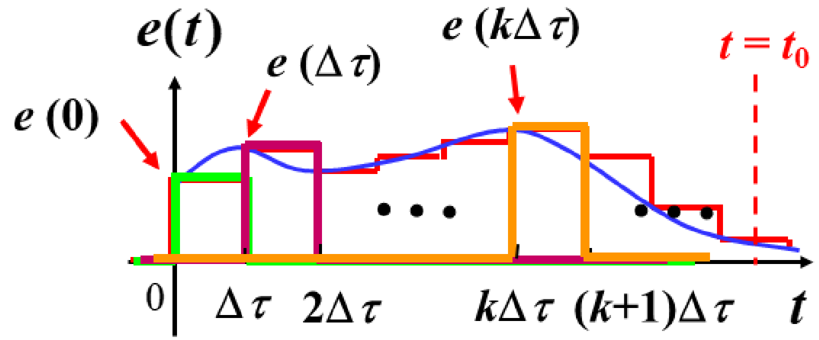
任意激励 → 若干脉冲函数(延时)之和



处理激励

$0 < t < t_0$时段时间上分割

任意激励 ⟶ 若干脉冲函数(延时)之和



$$e(t) \approx e(0)[\varepsilon(t)-\varepsilon(t-\Delta\tau)]+e(\Delta\tau)[\varepsilon(t-\Delta\tau)-\varepsilon(t-2\Delta\tau)]$$

$$\cdots+e(k\Delta\tau)[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-(k+1)\Delta\tau)]+\cdots$$

在$0 < t < t_0$时段将激励$e(t)$看成一系列(N个)宽度为$\Delta\tau$，高度为$e(k\Delta\tau)$矩形脉冲的和。

处理激励

$$
\begin{aligned}
e(t) \approx\ & e(0)[\varepsilon(t)-\varepsilon(t-\Delta\tau)]+e(\Delta\tau)[\varepsilon(t-\Delta\tau)-\varepsilon(t-2\Delta\tau)] \\
& \cdots+e(k\Delta\tau)[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-\left(k+1\right)\Delta\tau)]+\cdots \\
=\ & \lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1} e(k\Delta\tau)[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-(k+1)\Delta\tau)]
\end{aligned}
$$

建立这个表达式和单位脉冲函数之间的关系

怎么做?
此处可以有弹幕/投稿

$$
\begin{tikzcd}
p(t) \arrow[r, "\text{响应}"] \arrow[d] \arrow[dr, phantom, "\text{取极限}"] & h_p(t) \arrow[d] \\
\delta(t) \arrow[r, "\text{响应}"'] & h(t)
\end{tikzcd}
$$

处理激励

$$e(t) \approx e(0)[\varepsilon(t)-\varepsilon(t-\Delta\tau)]+e(\Delta\tau)[\varepsilon(t-\Delta\tau)-\varepsilon(t-2\Delta\tau)]$$

$$\cdots+e(k\Delta\tau)[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-\left(k+1\right)\Delta\tau)]+\cdots$$

$$=\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1} e(k\Delta\tau)[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-(k+1)\Delta\tau)]$$

建立这个表达式和单位脉冲函数之间的关系

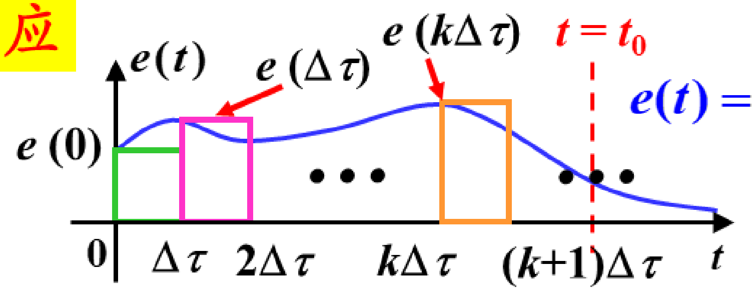
$$=\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1} e(k\Delta\tau)\frac{1}{\Delta\tau}[\varepsilon(t-k\Delta\tau)-\varepsilon(t-(k+1)\Delta\tau)]\Delta\tau$$

单位脉冲函数的延时

$$=\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1} e(k\Delta\tau)p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau \qquad 0<t<t_0$$

$$\begin{tikzcd}
p(t) \arrow[r, "响应"] \arrow[d] \arrow[dr, phantom, "取极限"] & h_p(t) \arrow[d] \\
\delta(t) \arrow[r, "响应"'] & h(t)
\end{tikzcd}$$

处理响应



$$e(t) = \lim_{N\to\infty} \sum_{k=0}^{N-1} e(k\Delta\tau)p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau$$

$$\begin{array}{ccc} p(t) & \xrightarrow{\text{响应}} & h_p(t) \\ \downarrow & \text{取极限} & \downarrow \\ \delta(t) & \xrightarrow[\text{响应}]{} & h(t) \end{array}$$

若单位脉冲函数 $p(t)$ 的响应为 $h_p(t)$

第1个矩形脉冲 $e(0)p(t)\Delta\tau \quad \rightarrow e(0)h_p(t)\Delta\tau$

$\vdots \qquad\qquad \vdots$

第k个矩形脉冲

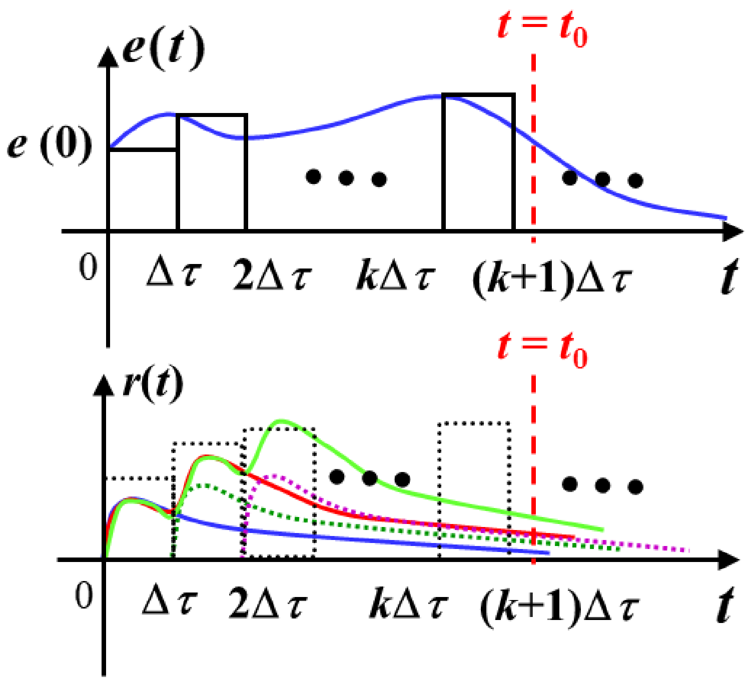
$$e(k\Delta\tau)p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau \quad \rightarrow e(k\Delta\tau)h_p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau$$

齐性

非时变性

所有的响应长得全一样，只不过开始时间和幅值有差别

处理响应



$$\begin{array}{ccc} p(t) & \xrightarrow{\text{响应}} & h_p(t) \\ \downarrow & \text{取极限} & \downarrow \\ \delta(t) & \xrightarrow[\text{响应}]{} & h(t) \end{array}$$

$k\Delta\tau$：脉冲作用时刻

t_0： 观察响应时刻

假设在t_0时刻以前有N个脉冲的作用

t_0时刻观察到的响应应为$0\sim t_0$时间内所有激励产生的在t_0时刻响应之和

响应

$$r(t_0)=\left(\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1}e(k\Delta\tau)\,h_p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau\right)\Bigg|_{t=t_0}$$

可加性

处理响应

响应

$$r(t_0)=\left(\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1}e(k\Delta\tau)\,h_p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau\right)\Bigg|_{t=t_0}$$

单位脉冲响应

积分

$h(t-\tau)$

单位冲激响应

$$p(t)\xrightarrow{\text{响应}}h_p(t)$$

取极限

$$\delta(t)\xrightarrow{\text{响应}}h(t)$$

当$N\to\infty$时，$\Delta\tau\to \mathrm{d}\tau,\ k\Delta\tau\to\tau,\ \Sigma\to\int$

$$r(t_0)=\left(\int_0^{t_0}e(\tau)h(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau\right)\Bigg|_{t=t_0}$$

t 参变量

τ 积分变量

由t_0的任意性，得 $r(t)=\int_0^t e(\tau)h(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau=e(t)*h(t)$

在单位冲激响应$h(t)$帮助下，可求任意激励$e(t)$作用下电路的零状态响应

23

3 卷积积分的定义和性质

卷积积分定义　　设 $f_1(t)$ ，$f_2(t)$ 　$t<0$ 均为零

$$\boxed{f_1(t)*f_2(t)=\int_0^t f_1(\tau)f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau}$$

t 参变量　　　τ 积分变量

未来在信号与系统课程中，会学习
$f_1(t)$，$f_2(t)$ $t<0$ 时有值情况下的卷积积分

电路中，
把$t<0$时激励的作用效果认为是初值，而把初值被放到ZIR里
并且$h(t)$本身在$t<0$时没有值。所以只讨论$f_1(t)$，$f_2(t)$ $t<0$ 均为零

令 $\xi = t - \tau$

$\tau:\ 0 \quad t$

$\xi:\ t \quad 0$

性质1 $f_1(t) * f_2(t) = f_2(t) * f_1(t)$

证明 $f_1(t) * f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau$

$$= \int_t^0 f_1(t-\xi) f_2(\xi)(-\mathrm{d}\xi)$$

$$= \int_0^t f_1(t-\xi) f_2(\xi)\mathrm{d}\xi \quad = f_2(t) * f_1(t)$$

性质2 $[f_1(t) * f_2(t)] * f_3(t) = f_1(t) * [f_2(t) * f_3(t)]$

性质3

$$f_1(t) * [f_2(t) + f_3(t)] = f_1(t) * f_2(t) + f_1(t) * f_3(t)$$

性质4 $f(t)*\delta(t)=\delta(t)*f(t)=\int_{0^-}^{t}\delta(\tau)f(t-\tau)\mathrm{d}\tau=f(t)$

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

$$e(t)=\lim_{N\to\infty}\sum_{k=0}^{N-1}e(k\Delta\tau)p(t-k\Delta\tau)\Delta\tau$$

当$N\to\infty$时，$\Delta\tau\to\mathrm{d}\tau,\ k\Delta\tau\to\tau,\ \Sigma\to\int$

$$e(t)=\int_0^t e(\tau)\delta(t-\tau)\mathrm{d}\tau=e(t)*\delta(t)$$

$$\begin{tikzcd} p(t) \arrow[r, "响应"] \arrow[d] \arrow[dr, phantom, "取极限"] & h_p(t) \arrow[d] \\ \delta(t) \arrow[r, "响应"'] & h(t) \end{tikzcd}$$

4 用卷积积分求零状态响应

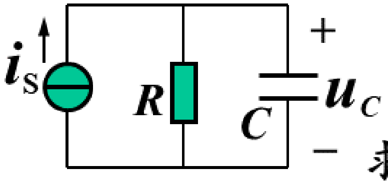
$$r(t) = e(t) * h(t)$$

即 $$r(t) = \int_0^t e(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

单位冲激响应+卷积积分

可求任意激励作用下电路的零状态响应

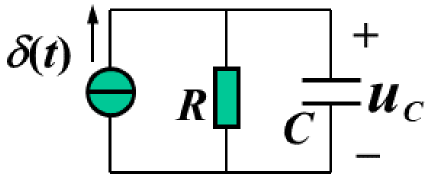
例



已知：R=0.5 Ω , C=1 F , $u_C(0^-)$=0

$$i_S = 2e^{-t}\varepsilon(t)\ \mathrm{A}$$

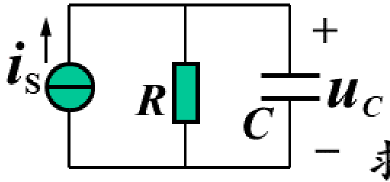
求：电容电压$u_C(t)$。



解　先求该电路的单位冲激响应 $h(t)$

设　$i_S = \delta(t)$ A

例

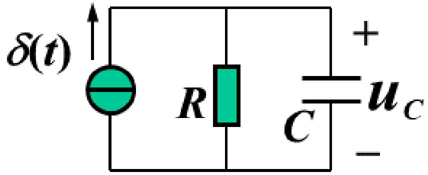


已知： R=0.5 Ω , C=1 F , $u_C(0^-)=0$

$$i_S = 2e^{-t}\varepsilon(t)\text{A}$$

求： 电容电压$u_C(t)$。

解 先求该电路的单位冲激响应 $h(t)$

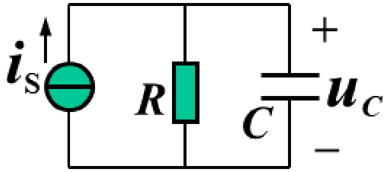


设 $i_S = \delta(t)$ A

$$u_C(0^+) = \frac{1}{C}\text{V=1V} \qquad u_C(\infty)=0$$

$$\tau = RC = 0.5\times 1 = 0.5 \text{ s}$$

$$\therefore h(t) = e^{-2t}\varepsilon(t)\text{V}$$



$i_S = \delta(t)$ A 作用下的单位冲激响应为

$$h(t) = e^{-2t}\varepsilon(t)\text{V}$$

用卷积积分计算 $i_S = 2e^{-t}\varepsilon(t)$ A 作用下的响应 $u_C(t)$

$$u_C(t) = i_S(t) * h(t) = \int_0^t i_S(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau \qquad = h(t) * i_S(t) = \int_0^t h(\tau)i_S(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

$$= \int_0^t 2e^{-\tau} \times e^{-2(t-\tau)}\mathrm{d}\tau \qquad = \int_0^t e^{-2\tau} \times 2e^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau$$

$$= 2e^{-2t}\int_0^t e^{\tau}\mathrm{d}\tau = 2e^{-2t}(e^{t}-1) \qquad = 2e^{-t}\int_0^t e^{-\tau}\mathrm{d}\tau$$

$$= 2e^{-t} - 2e^{-2t}\ \text{V} \quad t>0 \qquad = 2e^{-t}\left(1-e^{-t}\right)$$

5 卷积积分的图解法

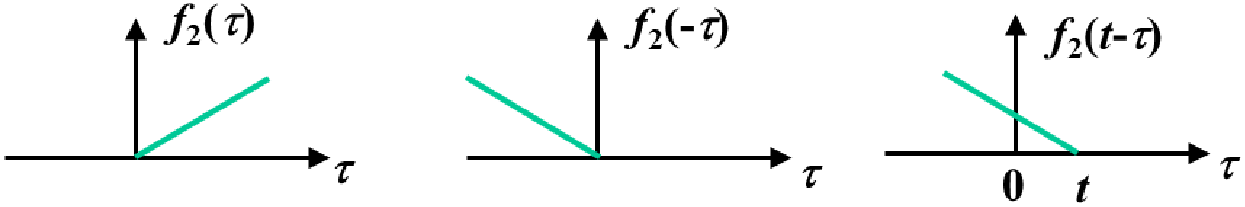
例　已知 $f_1(t)=2[\varepsilon(t)-\varepsilon(t-1)]$　　$f_2(t)=\mathrm{e}^{-t}\varepsilon(t)$

求　$f_1(t)*f_2(t)$　　和刚才不一样之处在哪?

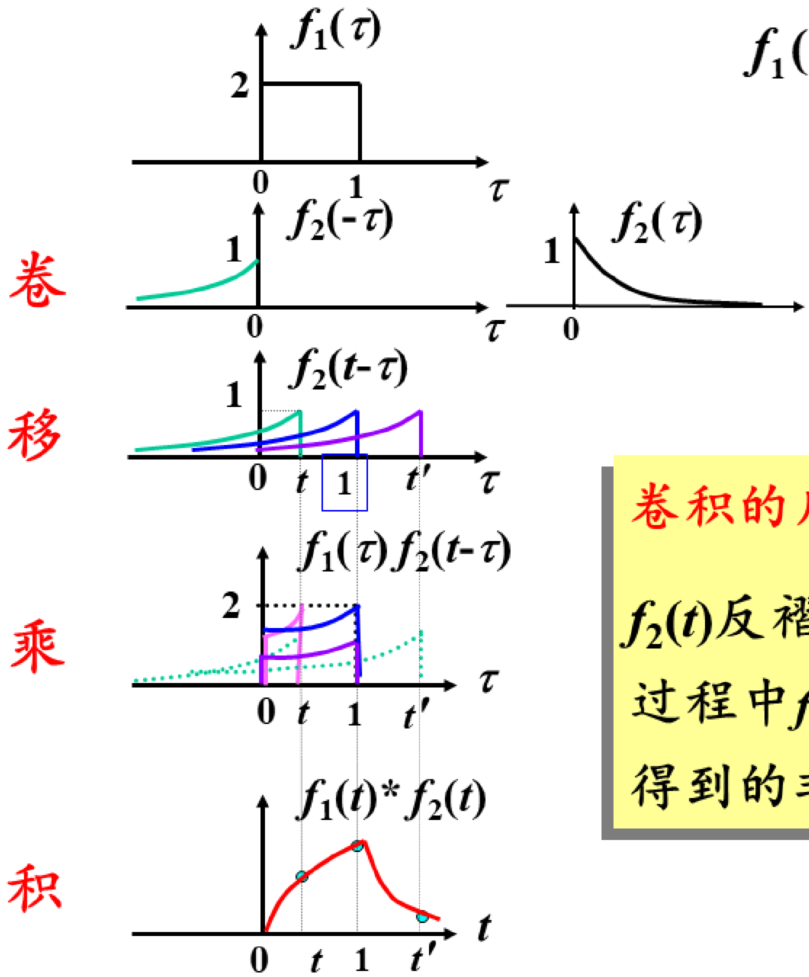
参变量(可视为常量)

解　$$f_1(t)*f_2(t)=\int_0^t \underbrace{f_1(\tau)f_2(t-\tau)}_{\text{被积函数}}\mathrm{d}\tau$$ 积分变量

图解说明 $f_2(t\text{-}\tau)$　　困难在于: $f_1(\tau)$和$f_2(t\text{-}\tau)$对不同τ的表达式是什么?



卷f_2



$$f_1(t) = 2[\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)]$$

$$f_2(t) = \mathrm{e}^{-t}\varepsilon(t)$$

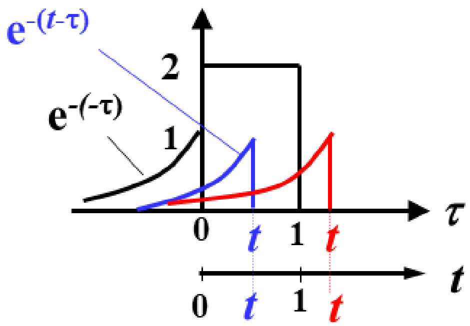
$$f_1(t) * f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$

卷积的几何解释：

$f_2(t)$反褶的图形$f_2(-\tau)$在移动过程中$f_2(t-\tau)$不断与$f_1(\tau)$相乘得到的非零图形的面积。

卷f_2

$$f_1(t) * f_2(t) = 2[\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)] * \mathrm{e}^{-t}$$



$t < 0 \qquad f(t) = 0$

$0 \le t \le 1 \qquad f(t) = \int_0^t 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2 - 2\mathrm{e}^{-t}$

$t \ge 1 \qquad f(t) = \int_0^1 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2\mathrm{e}^{-(t-1)} - 2\mathrm{e}^{-t}$

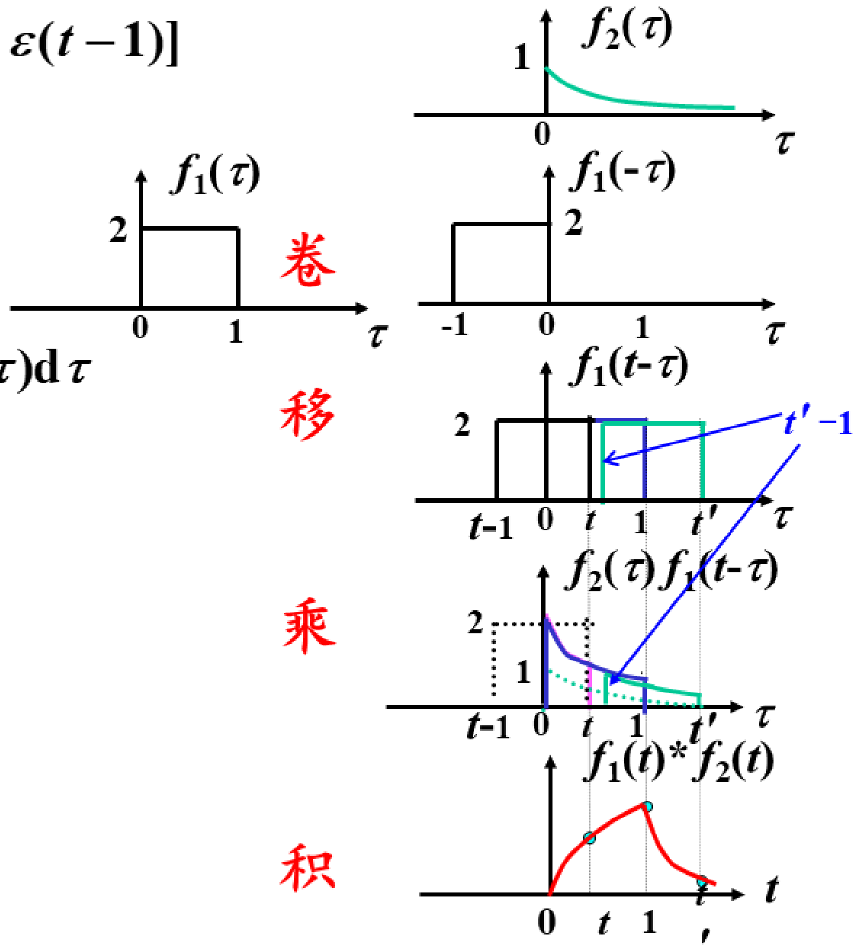
卷f_1

$$f_1(t) = 2[\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)]$$

$$f_2(t) = \mathrm{e}^{-t}\varepsilon(t)$$

$$f_2(t) * f_1(t)$$

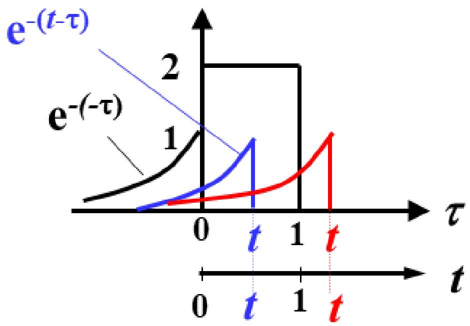
$$= \int_0^t f_2(\tau) f_1(t-\tau)\mathrm{d}\,\tau$$



由图解过程确定时段划分(t轴)和积分上下限(τ轴，考虑t坐标)

卷f_2

$$f_1(t) * f_2(t) = 2[\varepsilon(t) - \varepsilon(t-1)] * \mathrm{e}^{-t}$$

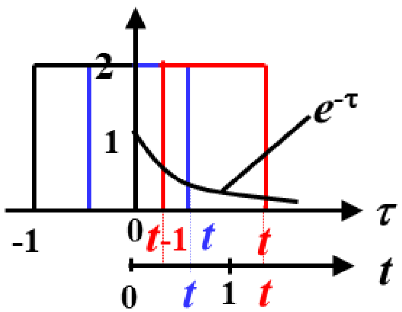


$t < 0 \qquad f(t) = 0$

$0 \le t \le 1 \qquad f(t) = \int_0^t 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2 - 2\mathrm{e}^{-t}$

$t \ge 1 \quad f(t) = \int_0^1 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2\mathrm{e}^{-(t-1)} - 2\mathrm{e}^{-t}$

卷f_1



$t < 0 \qquad f(t) = 0$

$0 \le t \le 1 \qquad f(t) = \int_0^t 2\mathrm{e}^{-\tau}\mathrm{d}\tau = 2 - 2\mathrm{e}^{-t}$

$t \ge 1 \quad f(t) = \int_{t-1}^t 2\mathrm{e}^{-\tau}\mathrm{d}\tau = 2\mathrm{e}^{-(t-1)} - 2\mathrm{e}^{-t}$

单选题 1分

$f(1)$=____.

$$t<0 \qquad f(t)=0$$

$$0\le t\le 1 \qquad f(t)=\int_0^t 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2-2\mathrm{e}^{-t}$$

$$t\ge 1 \quad f(t)=\int_0^1 2\mathrm{e}^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2\mathrm{e}^{-(t-1)}-2\mathrm{e}^{-t}$$

$$\mathrm{e}^{-1}=0.368$$

A 0

B 1.26

C 2

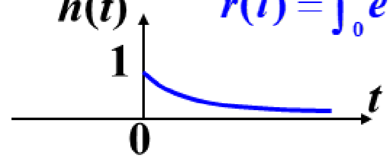
36

关键：t=0时$f(t-\tau)$在 τ 轴的什么位置？

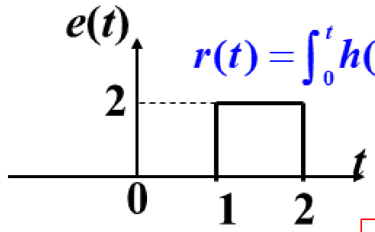
这个怎么办？

从而确定t 与 τ 的关系。

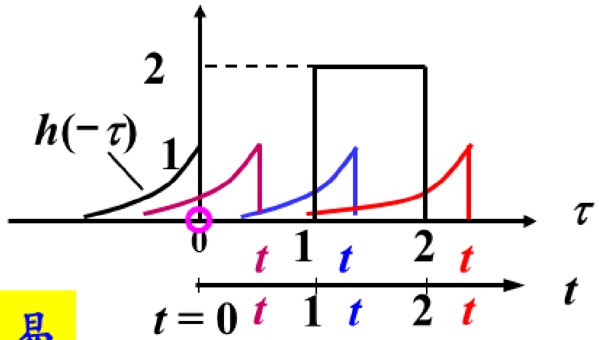
$$r(t)=\int_0^t e(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$



$$r(t)=\int_0^t h(\tau)e(t-\tau)\mathrm{d}\tau$$



思路1：t =0 → τ=0



易

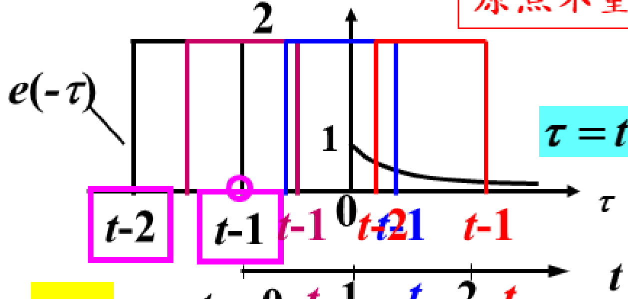
$0<t<1$ → 0

$1<t<2$ → $\int_1^t 2e^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 2(1-e^{1-t})$

$t>2$ → $\int_1^2 2e^{-(t-\tau)}\mathrm{d}\tau = 9.34e^{-t}$

思路2：t =0 → τ=−1

t 轴与 τ 轴的原点不重合



$\tau = t-1$

难

$t<1$ → 0

$1<t<2$ → $\int_0^{t-1} 2e^{-\tau}\mathrm{d}\tau = 2(1-e^{1-t})$

$t>2$ → $\int_{t-2}^{t-1} 2e^{-\tau}\mathrm{d}\tau = 9.34e^{-t}$

(任意阶电路在)任意激励下响应的推荐求法

- 零输入响应（ZIR)
  - L10-L12
- 单位冲激响应
  - L12/L13
- 零状态响应（卷积）
  - L13
- 全响应（FR=ZIR+ZSR)
  - 在R5有更多强调